This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Phys 2130.1.5

HARVARD COLLEGE LIBRARY

BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787–1855)
OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

SCIENCE CENTER LIBRARY

BIBLIOTHÈQUE

DES MERVEILLES

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. ÉDOUARD CHARTON

L'ACOUSTIQUE

PARIS. — IMP. A. LAHURE RUE DE FLEURUS 9.

BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES

L'ACOUSTIQUE

OU

LES PHÉNOMÈNES DU SON

PAR R. RADAU

TROISIÈME ÉDITION

MISE AU COURANT DES DERNIERS PROGRÈS

ET ILLUSTRÉE DE 116 VIGNETTES

PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET Cie

BOULEVARD SAINT-GERMAIN, N° 79

1880

Droits de propriété et de traduction réservés

Phys 2130.1.5

HARVARD COLLEGE
JUN 20 1923
LIBRARY
DEGRAND FUND

L'ACOUSTIQUE

I

LE SON DANS LA NATURE

Bruit et son musical. — Statue de Memnon. — Grotte de Fingal. — Voix des animaux. — Langage des bêtes. — Oiseaux chanteurs. — Insectes. — Reptiles et poissons. — Vie nocturne des animaux dans les forêts.

Le son, c'est le mouvement qui devient sensible à distance. Le repos est muet. Tout son, tout bruit annonce un mouvement. C'est le télégraphe invisible dont se sert la nature.

Aussi bien le son est un appel; on ne le comprend pas sans l'oreille qui l'écoute, comme on ne comprend point la lumière sans l'œil qu'elle frappe. Voix, parole, chant, il devient l'auxiliaire le plus précieux et le plus important de la vie de relation. On sait que les aveugles qui entendent et parlent sont bien supérieurs aux sourds-muets, qui ne vivent que par les yeux. C'est par la voix, fille de l'air, que les êtres vivants se communiquent le plus complètement leurs impressions et

leurs besoins ou leurs désirs; la voix appelle, avertit, attire ou repousse, menace ou caresse, implore ou maudit... Lorsqu'elle se fait parole dans la bouche de l'homme, elle exprime tout ce que l'esprit peut concevoir ou le cœur sentir. Incarnation merveilleuse qui prête un invisible corps à la pensée, elle porte d'esprit en esprit les passions, la foi ou le doute, le trouble ou la paix. Conçoit-on une humanité muette?

Nous nous proposons d'étudier le son sous toutes ses formes, sans nous préoccuper d'abord de la nature intime des phénomènes auxquels il donne lieu. On verra ensuite que ces phénomènes s'expliquent aussi complètement qu'on peut le désirer, par des considérations tirées de la théorie des vibrations, et que les règles de la musique même découlent en grande partie d'un certain nombre de faits physiques ou physiologiques qui sont du domaine des sciences d'observation. Il ne faut pas cependant que le lecteur s'effraye de cette perspective; nous ne ferons qu'effleurer ce côté de notre sujet, et nous nous bornerons, dans la plupart des cas, à l'indication des résultats obtenus, sans entrer dans aucun détail sur la démonstration des lois que nous ferons connaître. De cette façon, ce livre pourra être lu sans effort d'esprit par tous ceux qui aiment à comprendre les phénomènes au milieu desquels se passe notre existence.

Les impressions que perçoit l'oreille sont très variées; on distingue habituellement les *sons musicaux* des *bruits*. Toutefois cette distinction n'a rien de pré-

cis; on ne saurait admettre entre les sons et les bruits une différence d'essence ou de nature. Tous les bruits se composent de sons de très courte durée, presque instantanés, et plus ou moins dissonants. D'un autre côté, les sons musicaux, ou, pour parler avec plus de précision, les sons employés par les musiciens, ont souvent une durée excessivement courte, et les combinaisons dans lesquelles on les fait entrer peuvent être parfaitement dissonantes. Où est la limite qui sépare le son musical du bruit? Elle est tracée par le degré de plaisir ou de déplaisir que nous causent les impressions d'un organe dont la sensibilité varie d'un individu à l'autre, et il ne faudrait pas en demander la définition à une personne qui sortirait d'un spectacle de foire.

Le caractère le plus saillant du bruit, c'est l'irrégularité et la discontinuité de l'impression. Le roulement d'une voiture sur le pavé se compose d'une série d'explosions discordantes; le bruit que fait l'eau qui tombe du robinet d'une fontaine, est de même une suite rapide de notes saccadées. Dans le doux murmure d'un ruisseau, dans le bruissement des feuilles, les transitions sont déjà moins brusques ; enfin, dans d'autres bruits tels que les longs mugissements du vent qui s'engouffre dans les cheminées, les notes montent et descendent par degrés insensibles. Dans tous ces cas, cependant, nous rencontrons des successions irrégulières de sons hétérogènes qui se suivent trop rapidement pour laisser à la sensation musicale le temps de naître, tandis que les impressions que nous donnent les sons musicaux sont assez prolongées pour être perçues distinctement. C'est dans le même fait que réside la différence entre le langage parlé et le chant. D'habitude, on appelle aussi *bruit* un mélange

de sons que l'oreille ne parvient pas à confondre dans une sensation une et homogène. Ainsi on produira un bruit en posant la main étendue sur les touches d'un clavier de manière à faire entendre à la fois toutes les notes de la gamme. Il est clair, d'après ces exemples, que la distinction entre bruit et son peut n'être qu'une affaire de convention, et qu'on peut passer par mille transitions de l'un à l'autre, quoique la distance soit grande aux extrêmes. Tout le monde appelle bruit le cliquetis que produisent en tombant des morceaux de bois. Cependant, voici une expérience qui se fait souvent. On prend sept lames de bois dur, de même longueur et de même largeur, mais dont les épaisseurs décroissent de l'une à l'autre, suivant une certaine loi. On en laisse tomber une seule sur le plancher ; elle donne un bruit qui paraît n'avoir aucun caractère musical ; ensuite on les jette l'une après l'autre, suivant l'ordre de leurs épaisseurs décroissantes, et l'on entend parfaitement les sept notes de la gamme.

En frappant sur des cailloux convenablement choisis et suspendus à des fils, les Chinois produisent des sons assez agréables pour composer une mélodie. Beaucoup d'instruments employés dans les orchestres ne produisent, à parler proprement, que des bruits cadencés qui viennent se mêler à la musique pour soutenir le rythme : tels sont les cymbales, les castagnettes, les triangles.

La nature inorganique ne produit que des bruits. La voix du tonnerre, celle de l'ouragan et celle de la mer ne sont que des bruits confus [1].

Parfois cependant le hasard s'en mêle, et ces bruits

1. Les physiciens ne sont pas d'accord sur l'explication du tonnerre. La détonation du coup de foudre est causée par l'ébranlement de l'air

prennent un caractère musical. La statue de Memnon rendait un son au lever du soleil. Letronne, dans un mémoire consacré à ce célèbre prodige, a établi que le

Fig. 1. Statue de Memnon.

phénomène avait été constaté pour la première fois sous le règne d'Auguste. Le colosse venait d'être brisé par un accident inconnu, — peut-être un tremblement de terre, — et le tronc avait été jeté sur le sol. On s'aperçut alors qu'il s'échappait, le matin, comme une

sur le trajet de l'étincelle; le roulement qui suit la détonation s'explique peut-être par les réflexions répétées du son qui arrive des différents points, inégalement éloignés, du trajet de la foudre.

sorte de plainte de ces pierres disloquées. Le phénomène n'est pas du reste isolé : dans les carrières de granit à Syènes, dans les palais de Karnak et dans les temples de Philœ, aux environs de la Maladetta, dans les Pyrénées, et ailleurs, on a remarqué que les pierres granitiques font parfois entendre un craquement sonore au lever du soleil, surtout quand la différence de température entre le jour et la nuit est considérable. Quand l'empereur Septime-Sévère eut fait réparer la statue de Memnon, le miracle cessa de se produire ; les cinq assises de blocs de grès qui remplacèrent le tronc et la tête « formèrent une sourdine qui arrêta la vibration. »

La grotte de Fingal, dans l'ilôt de Staffa, présente un autre phénomène remarquable. Le fond de cette caverne est fermé et obscur comme un chœur d'église ; des piliers de basalte y figurent un buffet d'orgue noirci par le temps. Lorsqu'on pénètre jusqu'à l'extrémité de la grotte, on aperçoit presque à fleur d'eau une espèce d'antre d'où sortent des sons harmonieux chaque fois qu'une vague en dépasse le bord et que l'eau vient s'y engouffrer. C'est pour cette raison que, dans le pays de Galles, on donne à la grotte le nom de *Llaimh binn*, qui signifie *cave à musique*.

Pour obtenir du vent des notes musicales, on lui offre les cordes d'une harpe éolienne, — de six à dix cordes à boyau, tendues sur un cadre de bois léger qui est muni d'une table de résonance.

Dans le monde des animaux on rencontre une variété infinie de bruits et de sons musicaux ; ces bruits et ces chants constituent le langage des bêtes.

Il faut citer ici le livre de Wetzel, intitulé : *Nouvelle découverte sur le langage des bêtes* (Vienne, 1800). L'auteur s'efforce de démontrer que les animaux se font

comprendre les uns des autres par des combinaisons de sons qui constituent la plus simple des langues, une langue pleine de répétitions, qu'ils cherchent à se faire comprendre de l'homme, et qu'ils en comprennent, à leur tour, le langage, qu'enfin il serait possible d'étudier les idiomes des différents animaux et d'en déterminer les formes et les variations.

On trouve effectivement dans le livre de Wetzel les rudiments d'un dictionnaire de la langue des bêtes; cela remplit une vingtaine de pages. L'auteur a même essayé, comme application de ses principes, de traduire en allemand plusieurs dialogues de chiens, de chats, de poules et d'autres oiseaux. Il rapporte une conversation, composée de petits cris abrupts, qu'il prétend avoir surprise entre plusieurs renards captifs, et qui avait pour but de s'entendre sur les moyens propres à faciliter la fuite; il faut croire que le sens de cette conversation ne fut pas très-clair tout d'abord pour notre linguiste, car les trois renards parvinrent à s'échapper.

Il n'est pas douteux qu'à force d'observer les animaux on n'arrive à comprendre jusqu'à un certain point leur langue mystérieuse, et même à la parler. C'était l'avis de Dupont de Nemours. On lui doit un petit vocabulaire de la langue des corbeaux, des études sur la langue des chats et sur celle des chiens, etc.

Le père Kircher consacre aux voix des animaux un des chapitres les plus curieux de sa *Musurgie*. En tête, il place l'aï ou paresseux. Le paresseux ne fait entendre sa voix que pendant la nuit; son cri est *Ha ha ha ha ha!...*; il se compose de six notes qui forment une gamme ascendante et descendante, et qui sont émises à intervalles réguliers, chacune étant séparée de la suivante par une courte pause. Quand les Espagnols s'éta-

blirent dans le pays, ces cris nocturnes leur faisaient croire qu'ils entendaient des hommes qui vocalisaient dans les forêts. Kircher ne tarit pas d'admiration pour la voix du paresseux. « Si la musique avait été inventée en Amérique, dit-il, je n'hésiterais pas à déclarer qu'elle dérive du chant mirifique de cet animal. »

Les oiseaux sont de tous les animaux les mieux doués sous le rapport de la voix. Voici d'abord le perroquet, auquel rien ne manque pour imiter la parole humaine. Mais cette imitation est toute machinale, et rien ne prouve que les mots que l'oiseau prononce aient un sens pour lui.

Les sansonnets, les merles, les geais, les corbeaux, les choucas, qui tous ont la langue épaisse et arrondie comme le perroquet, arrivent également à imiter la parole d'une manière plus ou moins parfaite. Pourquoi ces oiseaux restent-ils toujours privés de cette expression de l'intelligence qui fait le langage humain? Buffon en trouve la raison dans leur prompt accroissement pendant le premier âge, et dans la courte durée de leur société avec leurs parents, dont les soins se bornent à l'éducation corporelle et ne se répètent ni ne se continuent assez de temps pour produire ces impressions durables et réciproques qui sont la source de l'intelligence.

Les oiseaux qui ont la langue fourchue sifflent plus aisément qu'ils ne jasent. Quand cette disposition naturelle se trouve réunie avec la mémoire musicale, ils apprennent à répéter des airs : le serin, la linotte, le tarin, le bouvreuil, se distinguent par leur docilité. Le perroquet, au contraire, n'apprend guère à chanter, mais il imite les bruits et les cris des animaux qu'il entend, il miaule, il aboie aussi facilement qu'il con-

trefait la parole. Le merle moqueur est doué du même talent.

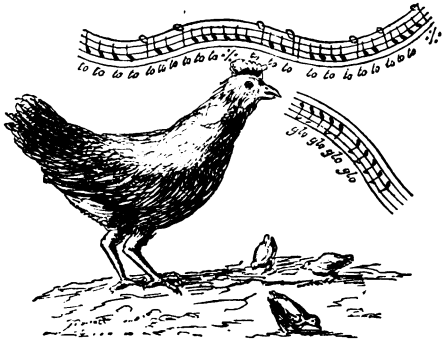
Le vrai chantre de nos forêts, c'est le rossignol. Par la variété prodigieuse de ses intonations et par l'expression passionnée que peut prendre sa voix, il efface tous

Fig. 2. Rossignol.

ses camarades. Ordinairement le chant du rossignol commence par un prélude timide, indécis; peu à peu il s'anime, s'échauffe, et bientôt on l'entend lancer vers le ciel les fusées de ses notes vives et brillantes. Ce sont des coups de gosier éclatants, qui alternent avec un murmure à peine perceptible; des trilles, des roulades précipitées et nettement articulées, des cadences plaintives, des sons filés, des soupirs amoureux... de temps à autre un court silence plein d'effet, puis le ramage

reprend, et les bois retentissent de nouveau d'accents doux et pénétrants qui remplissent l'âme de langueur. La voix du rossignol porte aussi loin que la voix humaine, on l'entend très-bien à 2 kilomètres lorsque l'air est calme; on l'entend d'autant mieux que le rossignol ne chante que la nuit, alors que tout est silence alentour. En général, ce n'est que le mâle qui chante; cependant, on a vu des femelles qui apprenaient également à chanter. Les rossignols captifs chantent pendant neuf ou dix mois de l'année; en liberté, ils ne commencent qu'au mois d'avril et finissent au mois de juin; passé ce mois, il ne leur reste qu'un cri rauque, une sorte de croassement. Pour les faire chanter en cage, il faut d'ailleurs les bien traiter, leur faire illusion sur leur captivité en les environnant de feuillages; dans ces conditions, ils se perfectionnent même et chantent plus agréablement que les rossignols sauvages. Le rossignol captif embellit son chant naturel des passages qui lui plaisent dans le chant des autres oiseaux qu'on lui fait entendre. Le son des instruments, celui d'une voix mélodieuse l'excite et stimule son talent; il cherche à se mettre à l'unisson et à éclipser ses rivaux, à couvrir tous les bruits qui se font à côté de lui; on a vu des rossignols tomber morts à force de lutter contre un chanteur rival.

Le père Kircher, dans sa *Musurgie*, analyse longuement le chant du rossignol. « Cet oiseau, dit-il, est ambitieux et avide d'éloges; il aime autant à faire parade de son art que le paon de sa queue. Lorsqu'il est seul, il chante simplement, mais dès qu'il est assuré d'avoir des auditeurs, il étale avec bonheur les trésors de sa voix, et invente les modulations les plus variées et les plus mirifiques. » Le père Kircher a essayé d'écrire


to to to

ces modulations en mesurant la durée des notes par un métronome d'un nouveau genre : une corde d'un pied et demi, tendue de manière que chaque oscillation complète eût la valeur d'un battement de pouls. Pour apprécier la hauteur des sons, il les compare aux vibrations d'une corde longue d'un pas, épaisse comme un fétu de paille et tendue par un poids d'une livre; on conviendra que cette définition laisse à désirer.

Après Kircher, Barrington a tenté à son tour de noter le chant du rosssignol, mais, de son propre aveu, sans succès. Les airs notés, exécutés par le plus habile joueur de flûte, ne rappelèrent pas du tout le chant naturel. Barrington dit que la difficulté doit venir de ce qu'il est impossible d'apprécier au juste la valeur de chaque note[1]. Au reste, si l'on n'est pas encore parvenu à écrire ce chant singulier, en revanche on réussit parfois à l'imiter en sifflant. Buffon parle d'une homme qui, par son chant, savait attirer les rossignols au point qu'ils venaient se percher sur lui et se laissaient prendre à la main. Quant à l'étendue de la voix du rossignol, elle ne paraît pas dépasser une octave; ce n'est que très-rarement que l'on entend quelques sons aigus qui vont à la double octave et passent comme des éclairs; dans ce cas, l'oiseau fait octavier sa voix par un effort de gosier exceptionnel et passager.

Kircher a noté le chant du coq, celui de la poule qui va pondre ou qui appelle ses petits, celui du coucou et celui de la caille. Nous reproduisons les curieuses figures où il représente les résultats de ces observations; nous omettons le perroquet, dont le cri naturel

1. Bettini (1614) a également noté le chant du rossignol, et Dupont de Nemours a essayé de le traduire.

est exprimé par le mot grec χαῖρε (*chaïré*) qui signifie : *bonjour*.

On peut dire que le chant est chez la plupart des oiseaux un appel d'amour. Presque seule, l'*alouette* se fait entendre depuis le printemps jusqu'à l'hiver; c'est que seule aussi elle conserve ses ardeurs pendant toute la durée de la saison d'été. L'alouette chante en volant; plus elle s'élève, et plus elle force la voix; on

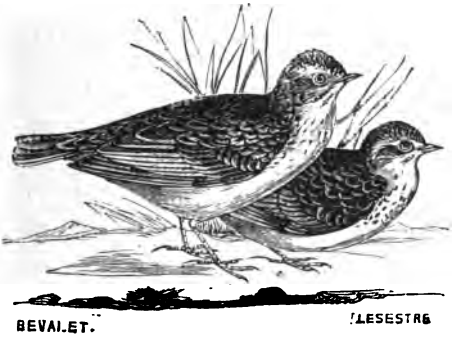


Fig. 7. Alouette commune.

l'entend encore lorsqu'elle a disparu dans l'azur du ciel. Rien n'est gai comme les notes perlées de ce chant. Du Bartas a essayé de l'imiter dans un joli quatrain bien connu ;

La gentille alouette, avec son tirelire,
Tirelire, relire et tirelant, tire
Vers la voûte du ciel; puis son vol en ce lieu
Vire et semble nous dire : Adieu, adieu, adieu !

La *calandre* est une espèce deux fois plus grande que l'alouette ordinaire; elle est commune en Italie et dans le midi de la France. Douée d'une voix forte et

agréable, elle sait varier son chant en contrefaisant le ramage du chardonneret, du serin, de la linotte, et même le piaulement des poussins, le cri de la chatte, etc. Les petits oiseaux dont le gai ramage remplit pendant l'été les bois, les vergers, les jardins et les bosquets, appartiennent, pour la plupart, au genre des *fauvettes*. L'une des familles les plus remarquables est celle des *pouillots*, qui imitent à s'y méprendre le chant de tous les autres oiseaux. On pourrait les appeler *moqueurs de France*, car ils partagent le talent du *moqueur* d'Amérique.

Chez les anciens, le cygne figurait aussi parmi les oiseaux doués de la faculté de chanter; mais il ne chantait qu'au moment de sa mort. Cette fable a été longtemps fort accréditée; encore aujourd'hui nous comparons au *chant du cygne* la dernière manifestation d'un génie qui s'éteint. Mais la voix du cygne n'est qu'une sorte de strideur que rend bien le mot *drenser*. Il est vrai que, d'après Buffon, on peut distinguer dans les cris du cygne sauvage une espèce de chant modulé, composé de notes bruyantes comme celles du clairon.

Les anciens faisaient aussi grand cas du chant de la *cigale*. Anacréon lui a consacré une ode. « Heureuse cigale, dit-il, qui sur les plus hautes branches des arbres, abreuvée d'un peu de rosée, chantes comme une reine ! Tu es chérie des Muses et de Phébus même, qui t'a donné ton chant harmonieux. » Homère compare la suave éloquence des vieillards troyens au concert des cicades.

Aujourd'hui nous ne pouvons reconnaître un chant dans les notes stridentes et monotones de cet insecte. Son appareil musical consiste en deux volets écailleux

(fig. 8) placés sur le ventre et qui n'existent que chez le mâle. Ces volets recouvrent deux cavités où se trouvent deux timbales ou membranes plissées qui résonnent comme du parchemin sec, et dont les contractions et relâchements répétés produisent un bruit de stridulation. D'autres parties de cet appareil compliqué paraissent être destinées à renforcer le son.

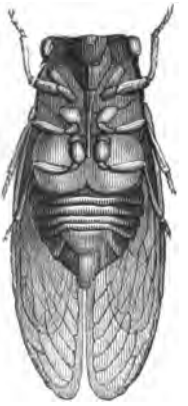


Fig. 8. Cigale.

La *cigale plébéienne* est très commune en Provence et remonte quelquefois assez loin dans le Nord ; on la rencontre à Fontainebleau. « Quand elle chante, dit M. Maurice Girard, elle remue rapidement son abdomen, de manière à l'éloigner et le rapprocher alternativement des opercules des cavités sonores. Sa stridulation est forte et aiguë, formée d'une seule note fréquemment réitérée, finissant par s'affaiblir peu à peu et se terminant par une sorte de sifflement, comme *st*, analogue au bruit de l'air sortant par une petite ouverture d'une vessie que l'on comprime. Si on la saisit, elle jette des cris très forts, qui diffèrent assez notablement de son chant en liberté. » En sifflant devant une cigale de manière à imiter sa stridulation, on la charme et l'attire ; il est alors facile de s'en emparer.

Dans les pays du Nord, on prend souvent pour la cigale la grande sauterelle verte dont le cri rappelle celui de la cigale ; les figures qui ornent les anciennes éditions de La Fontaine représentent aussi une sauterelle

à propos de la fable intitulée *la Cigale et la Fourmi*. Ces deux insectes appartiennent cependant à deux ordres entièrement distincts : la cigale est un hémiptère, la sauterelle un orthoptère.

Chez tous les orthoptères sauteurs : grillons, sauterelles et criquets, le mâle appelle la femelle par une

Fig. 9. Grillon.

stridulation due au frottement des élytres ; mais le mécanisme qui produit ce bruit monotone diffère un peu d'une espèce à l'autre [1].

Le *grillon* ou *cricri* frotte l'une contre l'autre ses élytres entières, sillonnées de nervures épaisses, dures et saillantes. Les voyageurs racontent que, dans certaines régions de l'Afrique, on élève les grillons dans de petites cages à claire-voie. Leur chant amoureux charme les oreilles des indigènes ; il dispose au sommeil.

Les *courtilières* ou *taupes-grillons* émettent des notes lentes, monotones, moins pénétrantes que celles

1. Voyez le Mémoire du colonel Goureau dans les *Annales de la Société entomologique de France*.

du grillon champêtre, et qui rappellent vaguement le cri de la chouette ou de l'engoulevent.

Les *sauterelles* produisent une stridulation aiguë par le frottement de deux membranes transparentes et garnies de nervures, appelées *miroirs*, qui existent à la base des élytres et que l'on pourrait comparer à des cymbales. Le *zig-zig* monotone de la sauterelle verte

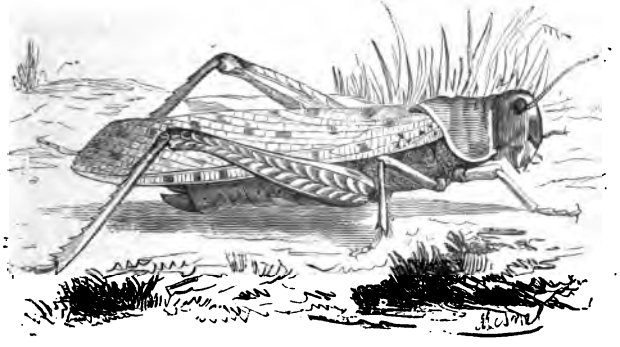


Fig. 10. Criquet.

s'entend le soir et toute la nuit, dans les prairies un peu humides ; le *dectique* chante de jour, dans les blés mûrs. Enfin, les *criquets* ou *acridiens* (ce sont eux qui ravagent nos colonies) produisent des sons moins musicaux, mais plus variés que ceux des espèces précédentes. Ils ont les cuisses et les élytres garnis de nervures saillantes très dures. Les cuisses frottent sur les élytres comme un archet sur les cordes d'un violon. Ordinairement les deux pattes frottent à la fois, mais l'on voit aussi l'insecte se servir tour à tour de la patte gauche et de la droite. Une sorte de tambour, recouvert d'une peau très mince, qui se trouve de chaque côté du corps à la base de l'abdomen, semble

destiné à renforcer le son. Le chant des criquets ressemble à un bruit de crécelle, mais avec des timbres très divers, selon les espèces. On distingue plusieurs notes, et le chant se modifie suivant qu'il appelle une femelle ou qu'il provoque un rival. Yersin a essayé de noter le chant de ces insectes. De même, Charles Butler, l'auteur de la *Monarchie féminine*, a tenté de noter les bruissements d'ailes qu'on entend dans l'intérieur d'une ruche d'abeilles qui va *jeter*. Les bourdons produisent, avec leurs ailes, un bruit que leur nom imite par onomatopée [1]. Les *vrillettes*, en oscillant sur leurs six pattes, frappent le bois des vieux meubles avec leurs mandibules fermées, et produisent ainsi les coups secs que l'on entend pendant la nuit.

Les reptiles sont loin d'être muets. La voix des crocodiles et des caïmans peut se comparer au miaulement d'un chat dans le jeune âge, et à des sanglots entrecoupés ou à des mugissements dans l'âge adulte. Ils trompent parfois les passants par des cris qui semblent venir d'un enfant. Les serpents n'ont, en fait de voix, qu'un sifflement aigu, sauf le serpent à sonnettes, qui porte au bout de la queue un grelot formé par des cornets écailleux, emboîtés les uns dans les autres, et dont le nombre augmente avec l'âge. Le « peuple coassant » des grenouilles et rainettes est connu par sa loquacité.

1. On a remarqué que pendant le vol des insectes ce bourdonnement change de hauteur. Ainsi, d'après M. Oppel, une mouche qui se pose fait entendre une note voisine du *si*, mais lorsqu'elle s'envole le son monte au *mi*. M. Pisko a constaté que le son s'abaissait au moment où l'insecte passait à côté de son oreille, et il attribue ce phénomène à l'influence du mouvement de la source sonore sur la hauteur du son. D'après Duméril et Burmeister, ce bourdonnement ne serait pas produit par les ailes, car on l'entend encore après que les ailes ont été coupées: le bruit serait dû au passage de l'air par les stigmates du thorax.

Les poissons, qui passent pour être muets, ne le sont pas tous. Les lyres, les malarmats, les maigres d'Europe, les ombrines communes, les hippocampes à museau court, émettent des sons d'une nature particulière. Cette faculté, qui est commune aux mâles et aux femelles, atteint sa plus grande perfection à l'époque du frai. Les maigres surtout, lorsqu'ils se rassemblent en troupes, produisent un bruit assez fort qui semble sortir de l'eau et qui leur a mérité le nom *d'orgues vivantes*. M. Dufossé, qui s'est spécialement occupé de ce sujet, a trouvé que les bruits en question sont produits par le frémissement de certains muscles; chez quelques espèces ils sont renforcés par la vessie pneumatique.

Ainsi, mille voix se réunissent pour faire jour et nuit le grand concert de la nature. L'air est toujours rempli de son. Même quand nous nous croyons dans un silence complet, nous sommes encore entourés de bruits; on s'en aperçoit bien quand on veut écouter quelque son très faible que ces bruits empêchent d'arriver à nous distinctement. Pour savoir ce que c'est que le silence, il faut monter sur une haute montagne, sur une cime bien isolée.

Chaque région de la terre a, pour ainsi dire, sa physionomie acoustique. Près des grandes villes, on entend mille bruits confus qui trahissent l'activité humaine, comme le bourdonnement des abeilles dans une ruche nous révèle qu'elle est habitée. A Paris, ce sourd murmure persiste toute la nuit. Le jour, il y a des rues où l'on ne s'entend point parler quand il y passe beaucoup de voitures. Le roulement des voitures est encore renforcé par le sol trop élastique de la grande ville, qui recouvre les catacombes à la manière d'une table de violon.

Dans nos campagnes d'Europe, ce sont les petits oiseaux qui donnent le ton général à l'orchestre de la forêt. En Amérique, ce sont d'autres voix plus puissantes. Écoutons Alexandre de Humboldt lorsqu'il nous parle de la vie, ou plutôt des voix nocturnes des animaux dans les forêts des tropiques. Il passait la nuit sous la voûte du ciel, après avoir choisi sur les bords de l'Apure une plaine sablonneuse qui allait rejoindre à peu de distance la lisière d'une épaisse forêt vierge. La nuit était fraîche et éclairée par la lune. Un profond silence, troublé seulement de temps à autre par le ronflement des dauphins d'eau douce, régnait dans la plaine et sur la rivière. « Il était plus de onze heures, dit Humboldt, quand commença dans la forêt voisine un vacarme tel qu'il fallut renoncer absolument à dormir le reste de la nuit, Tout le taillis retentissait de cris sauvages. Parmi les voix nombreuses qui se mêlaient dans ce concert, les Indiens ne pouvaient reconnaître que celles qui, après une courte pause, recommençaient seules à se faire entendre. C'étaient les hurlements gutturaux et monotones des alouates, la voix plaintive et flûtée des petits sapajous, le ronflement du singe dormeur, les cris entrecoupés du grand tigre d'Amérique, du cagouar ou lion sans crinière, du pécari, du paresseux et d'un essaim de perroquets, ceux des parraquas et d'autres gallinacés. Lorsque les tigres s'avançaient vers la limite de la forêt, notre chien, qui auparavant aboyait sans cesse, cherchait en hurlant un refuge sous nos hamacs. Quelquefois le rugissement du tigre descendait du haut des arbres ; toujours alors il était accompagné des cris aigus et plaintifs des singes, qui s'efforçaient d'échapper à ce danger nouveau pour eux. »

Si l'on demande aux Indiens la cause de ce tumulte continuel, ils répondent en riant que les animaux aiment à voir la lune éclairer la forêt, qu'ils font fête à la pleine lune. Mais ce n'est pas la lune qui les excite le plus ; c'est pendant les violentes averses que les cris sont le plus bruyants, ou lorsqu'au milieu des grondements du tonnerre un éclair illumine l'intérieur de la forêt.

Ces sortes de scènes offrent un contraste singulier avec le calme qui règne sous les tropiques vers l'heure de midi, par les grandes chaleurs, alors que que le thermomètre marque plus de 40° à l'ombre. Les grands animaux s'enfoncent à cette heure dans les profondeurs de la forêt, les oiseaux se cachent sous le feuillage des arbres ou dans les crevasses des rochers, pour éviter les rayons ardents qui tombent du zénith ; en revanche, les pierres unies et les blocs arrondis sont couverts d'iguanes, de geckos, de salamandres, qui, immobiles, la tête levée et la bouche béante, semblent aspirer avec délices l'air embrasé. « Mais, dit Humboldt, si, durant ce calme apparent de la nature, on prête l'oreille à des sons presque imperceptibles, on saisit à la surface du sol et dans les couches inférieures de l'air un bruissement confus produit par le murmure et le bourdonnement des insectes. Tout annonce un monde de forces organiques en mouvement. Dans chaque broussaille, dans l'écorce fendue des arbres, dans la terre que fouillent les hymènoptères, la vie s'agite et se fait entendre ; c'est comme une des mille voix que la nature adresse à l'âme pieuse et sensible de l'homme. »

II

EFFETS DU SON SUR LES ÊTRES VIVANTS

Puissance de la musique. — Légendes et anecdotes. — La musique comme remède. — Les tarentelles. — Effets de la musique sur les animaux.

Comme le peintre s'empare de la lumière pour en faire un messager de la pensée, le musicien commande aux sons et les charge de traduire des sentiments. La musique est donc une langue comme une autre, langue d'autant plus douce et plus charmante qu'elle est moins précise et moins subtile : c'est le rêve de la parole.

On définit généralement la musique l'art de combiner les sons d'une manière agréable à l'oreille. Les anciens philosophes donnaient à ce mot un sens beaucoup plus étendu. Pour eux, la musique comprenait la danse, le geste, la poésie et même toutes les sciences. Hermès déclare que la musique est la connaissance de l'ordre de toutes choses ; Pythagore et Platon enseignaient que tout l'univers est musique. De là cette musique céleste, — harmonie des mondes, — danse des sphères, qui a troublé tant de têtes.

La musique a été probablement le premier des arts : l'homme avait dans l'oiseau un maître à chanter. Les instruments à vent — flûtes et pipeaux — ont dû venir après. Diodore en attribue la première idée à quelque pâtre qui avait étudié le sifflement du vent dans les roseaux. Lucrèce est du même avis :

> Et Zephyri cava per calamorum sibila primum
> Agresteis docuere cavas inflare cicutas.

Les instruments à cordes et ceux qu'on bat pour en tirer un bruit sourd — tambours et timbales — sont également fort anciens. L'antiquité attribuait l'invention de la musique tantôt à Mercure, tantôt à Apollon ; Cadmus, qui amena en Grèce la musicienne Hermione, Amphion, Orphée, et d'autres encore, sont cités comme étant les pères de la musique instrumentale. D'après la Genèse, les joueurs de flûte et de cithare descendent de Jubal, fils de Lamech et d'Ada de la race de Caïn. La vérité, c'est que l'origine des instruments de musique se perd dans la nuit des temps.

L'influence de la musique sur les mœurs des peuples et sa puissance sur les âmes sont reconnues par tous les philosophes de l'antiquité. Platon prétend qu'on peut assigner les sons qui font naître la bassesse et l'insolence, et d'autres qui produisent les vertus opposées. Pour lui, un changement introduit dans la musique doit en entraîner un dans la constitution de l'État.

Polybe nous dit qu'en Arcadie, pays triste et froid, la musique était nécessaire pour adoucir les mœurs des habitants ; que nulle part il ne se commettait autant de crimes qu'à Cynète, où elle était négligée. D'après Athénée, on mettait autrefois en vers et en musique toutes les lois divines et humaines, les préceptes de la

morale, les légendes et histoire des peuples, et tout cela était chanté publiquement par des chœurs, au son des instruments. Les Juifs avaient des usages analo-

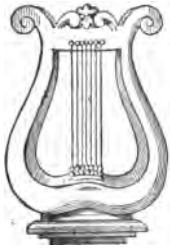


Fig. 11. Lyre d'Apollon.

Fig. 12. Plectrum

Fig. 13. Cithare.

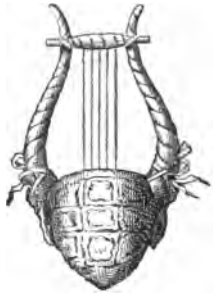


Fig. 14. Cithare.

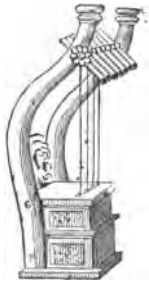


Fig. 15. Cithare.

Fig. 16. Cithare.

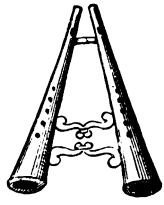


Fig. 17. Flûte double.

Fig. 18. Flûte de Pan.

gues. La musique prêtait à ces choses abstraites un charme particulier, et les gravait dans l'esprit des auditeurs.

Selon les philosophes de l'école de Pythagore, l'âme humaine est en quelque sorte formée d'harmonie. Ils

croyaient possible de rétablir, par le moyen de la musique, cette harmonie préexistante et primitive de nos facultés intellectuelles, troublée trop souvent par le contact des choses de ce bas monde. Les anciens auteurs sont pleins de récits qui se rapportent au pouvoir miraculeux des sons.

Les chants d'Orphée domptaient les bêtes féroces, suspendaient le cours des fleuves et faisaient danser les arbres et les rochers. Quand la mort lui eut ravi Eurydice, il descendit aux enfers; les sombres divinités, charmées par la douceur de ses accords, lui accordèrent le retour de sa femme, qu'il aurait ramenée sur la terre s'il avait pu s'empêcher de regarder en arrière pendant leur ascension.

Le divin Amphion bâtit les murs de Thèbes au son de sa lyre ; les pierres venaient d'elles-mêmes se placer les unes sur les autres, dans l'ordre prescrit.

. . . . . Agitataque saxa per artem
Sponte sua in muri membra coisse ferunt.

Ici la musique fait naître les remparts d'une ville; ailleurs, elle les fera tomber : les murs de Jéricho s'écroulent au son des trompes des prêtres d'Israël.

Le pouvoir que l'on attribue à la musique d'exciter et de calmer les passions a fourni la matière d'un grand nombre de légendes.

Sans remonter jusqu'aux temps légendaires, nous rencontrons dans l'histoire moderne des exemples célèbres du pouvoir de la musique. Qui n'a entendu parler du *Ranz des vaches*, cet air qui donnait le mal du pays aux Suisses engagés dans les armées étrangères? On se vit à la fin obligé de défendre, sous peine de mort, de jouer cet air dans leurs troupes, parce qu'il faisait fondre

en larmes, déserter ou mourir ceux qui l'entendaient.

« On chercherait en vain, dit J.-J. Rousseau, dans cet air les accents énergiques capables de produire de si étonnants effets. Ces effets, qui n'ont aucun lien sur les étrangers, ne viennent que de l'habitude, des souvenirs, de mille circonstances qui, retracées par cet air à ceux qui l'entendent et leur rappelant leur pays, leurs anciens plaisirs, leur jeunesse et toutes leurs façons de vivre, excitent en eux une douleur amère d'avoir perdu tout cela. La musique alors n'agit point précisément comme musique, mais comme signe mémoratif. Cet air, quoique toujours le même, ne produit plus aujourd'hui les mêmes effets qu'il produisait ci-devant sur les Suisses, parce qu'ayant perdu le goût de leur première simplicité, ils ne la regrettent plus quand on la leur rappelle. Tant il est vrai que ce n'est pas dans leur action physique qu'il faut chercher les plus grands effets des sons sur le cœur humain ! »

La musique militaire joue néanmoins un rôle extrêmement important dans l'histoire des batailles. Une musique rapide, éclatante, composée de notes brèves, fouette le sang et pousse à l'action. Shakspeare appelle le tambour le grand excitateur du courage. Que de sang *la Marseillaise* n'a-t-elle pas fait couler !

Les hommes ne sont cependant pas tous également sensibles à la musique. Quelques-uns montrent pour elle de l'indifférence et même de la répulsion. Saint Augustin les frappe d'anathème; à ses yeux l'aversion pour la musique est une marque de réprobation. C'est assurément aller trop loin, car cette étrange exception ne saurait s'expliquer que par un défaut de l'organisation physique, et l'on peut citer plusieurs grands hommes

Fig. 19. La Tarentelle, d'après Kircher.

qui étaient affligés de cette infirmité. Il se rencontre, d'autre part, des organisations d'une sensibilité exagérée, chez lesquelles la musique provoque facilement des crises de nerfs. Enfin nos médecins aliénistes l'emploient utilement pour calmer leurs malades.

Au moyen âge, on croyait que les sons pouvaient guérir l'épilepsie, la rage, l'hystérie, les fièvres nerveuses, et même la bêtise. Le père Kircher nous dit que la musique est le remède ordinaire de la danse de saint Guy. Les personnes atteintes de cette maladie bizarre sautent et dansent jusqu'à ce qu'elles tombent épuisées de fatigue; on les guérit par une musique fortement rythmée qui les excite encore davantage, et fait pour ainsi dire aboutir le mal. A l'époque où cette maladie était endémique en certaines régions de l'Italie, des musiciens ambulants parcouraient le pays pour offrir leur assistance. Les airs de danse très rapides qu'ils jouaient sont connus sous le nom de *tarentelles*, dénomination qui rappelle que le préjugé populaire attribuait le mal en question à la piqûre de la tarentule.

Sous le titre de *Phonurgia iatrica*, le père Kircher consacre un chapitre étendu à l'emploi de la musique comme moyen thérapeutique. Cette idée mériterait d'être développée et de recevoir une application plus large que celle qu'elle a trouvée jusqu'ici. Il est incontestable que la musique peut agir comme un excitant ou comme un calmant, selon le rythme qu'on emploie et selon la nature de l'air qu'on joue. [1]

On sait que chez les enfants le système nerveux est toujours très excité. Un rien les effraye; les moindres choses exaltent leurs petites idées. Ce sont des joies

1. Voyez, à cet égard, les intéressantes recherches de M. Rambosson.

grandes, des étonnements, des rires, des terreurs soudaines. Les nourrices les calment par un chant doux, monotone, lentement rythmé; bercé de mélodie, l'enfant s'apaise et s'endort. Un air joyeux le met en belle humeur. C'est pour cette raison que le père de Montaigne faisait toujours éveiller son fils au son de quelque instrument, afin de le tenir dans une disposition d'esprit sereine et calme.

La musique repose ou excite l'esprit, calme ou enflamme les sens, attriste ou égaye le cœur. Elle agit même en quelque sorte sur le physique. Tout le monde sait combien un air fortement accentué aide à la marche : on se fatigue moins en marquant le pas d'une manière régulière. Les ouvriers qui manœuvrent une grue, les matelots qui tirent un cabestan, se donnent de la force en chantant un air dont le rythme concorde avec celui de leurs mouvements. Les airs de danse mettent en branle les jambes.

Le revers de la médaille, c'est que la musique qui s'impose indiscrètement quand on ne la cherche pas est plus importune qu'un simple bruit, par le trouble qu'elle apporte dans le cours des pensées. C'est pourquoi le piano est un des fléaux des grandes villes.

Beaucoup d'animaux sont sensibles à la musique. Si tout ce qu'on raconte à cet égard n'est pas vrai, il y a cependant un grand nombre d'observations parfaitement authentiques. En première ligne, il faut placer les oiseaux chanteurs, qui forment un orchestre d'exécutants. Ailleurs nous rencontrons encore les simples amateurs. On sait que le cheval apprend aisément à régler ses mouvements sur des airs de musique.

On a cru remarquer aussi que les bestiaux paissent plus longtemps au son d'un flageolet ou d'un autre in-

strument; les Arabes prétendent que la musique les engraisse. Dans le désert, lorsque les chameaux d'une caravane sont près de succomber de lassitude, les conducteurs mettent plus de vivacité dans leurs chants afin de soutenir les bêtes.

Buffon nous apprend que les chiens sont très sensibles aux sons musicaux. « J'ai vu, dit-il, quelques chiens qui avaient un goût marqué pour la musique et qui arrivaient de la basse-cour ou de la cuisine au concert, y restaient tout le temps qu'il durait, et s'en retournaient ensuite à leur domicile ordinaire. J'en ai vu d'autres prendre assez exactement l'unisson d'un son aigu qu'on leur faisait entendre de près, en leur criant à l'oreille. » L'organisation canine offre cependant de grandes diversités sous ce rapport. Beaucoup de chiens hurlent lorsqu'on les oblige à entendre tel instrument, ils restent indifférents à d'autres instruments. On voit des caniches manifester leur antipathie pour certains sons, en se tordant de la façon la plus risible avec des hurlements plaintifs.

Un animal inférieur qui paraît être particulièrement soumis au charme des sons, c'est le serpent. Certains nègres — les psylles des anciens — apprivoisent les serpents et les font danser au son d'une douce musique. Les lézards et les araignées se montrent également sensibles à l'influence des sons.

D'où vient la puissance que la musique exerce sur les âmes ? quelle est la secrète affinité par laquelle les sons excitent les passions ?

La musique est l'image du mouvement. Elle emploie des sons échelonnés par intervalles réguliers, entre lesquels la voix monte et descend, selon les caprices du musicien. En faisant varier la durée et l'intensité des

notes diverses qui se succèdent, il arrive à peindre toutes les nuances de vitesse, toutes les allures possibles, depuis la lenteur somnolente d'un cours d'eau qui se perd dans les sables, jusqu'à la fougueuse impétuosité du torrent. Or les sons agissent directement sur le système nerveux, par les frémissements qu'ils impriment aux fibres sensitives; ils provoquent ainsi la disposition d'esprit qui correspond au genre de mouvement exprimé par la musique. La gaieté est caractérisée par une allure vive et légère, la gravité par un mouvement d'une lenteur solennelle, la colère par une précipitation saccadée. Ces différents caractères s'appliquent d'ailleurs aussi bien aux mouvements du corps qu'à l'émission de la parole et aux mouvements des idées; tout cela se tient, et c'est justement dans cette solidarité d'impression et d'action du corps et de l'âme qu'il faut chercher l'explication des effets de la musique. La tristesse paralyse nos membres en même temps qu'elle ralentit le discours et qu'elle arrête le flux des idées; une musique dont les notes gravissent lentement et péniblement la faible pente des demi-tons dispose à de mélancoliques rêveries; quand au contraire les notes gambadent de quinte en octave, tout notre être est remué par une velléité d'action et de trémoussement qui a son expression symbolique dans la danse et le rire.

Cette explication des effets psychologiques de la musique n'a pas échappé à Aristote. Pourquoi, dit-il, les rythmes et les mélodies s'adaptent-ils aux dispositions de l'esprit, mais non les saveurs, ni les couleurs, ni les odeurs ? Est-ce parce qu'ils sont des mouvements, comme le sont les actions ? Leur énergie intrinsèque

repose sur un ton déterminé et communique aussi ce ton. Les saveurs et les couleurs n'agissent pas de même....

Il est d'ailleurs d'autres mouvements qui produisent sur nous des effets de tout point semblables à ceux de la musique. La cascade qui se précipite du haut d'un rocher, le filet limpide qui ruisselle doucement dans un lit sableux, les vagues qui, sans cesse renaissantes, attaquent le rivage de l'Océan, nous impressionnent comme une musique visible. On peut rester des heures entières, couché sur la plage, à regarder les ondes qui se succèdent en se poursuivant. « Le rythme de ce mouvement qui n'est pas sans offrir un continuel changement dans les détails, éveille un sentiment particulier de repos agréable sans ennui, et fait naître en nous l'idée d'une vie immense, mais régie par un ordre parfait et harmonieux. Quand la mer est calme et sans rides, on peut s'amuser un temps à en contempler les belles couleurs, mais le plaisir ne dure pas autant que lorsque l'eau est agitée. Les ondes plus petites qui se forment à la surface des nappes d'eau limitées, se succèdent avec trop de précipitation et inquiètent plutôt l'esprit qu'elles ne l'amusent[1]. »

1. Helmholtz, *Théorie physiologique de la musique.*

III

PROPAGATION DU SON DANS LES DIFFÉRENTS MILIEUX

Effet du vide. — Propagation dans les gaz — dans l'eau — par le sol. — Expérience de M. Wheatstone. — Le stéthoscope. — Le téléphone et le microphone.

Comment le son se transmet-il jusqu'à l'oreille qui le perçoit? quel est l'invisible pont sur lequel il franchit les distances? La réponse est facile. De toutes parts, un fluide élastique et léger nous environne ; les vents nous montrent qu'il peut produire les plus puissants effets mécaniques; toute agitation un peu forte s'y propage aussitôt et se fait sentir loin du point d'origine N'est-il pas dès lors naturel d'admettre que le fluide aérien propage, de la même manière, les mouvements qui donnent lieu à un son? Nous voyons, d'ailleurs, qu'une détonation violente est toujours accompagnée d'un brusque déplacement de l'air, d'un choc fort sensible à distance. Aussi les physiciens n'ont pas tardé à soupçonner que l'air est le véhicule matériel du son, et ils ont songé à démontrer cette vérité en la retournant : sans air point de son. Voici l'expérience bien simple à l'aide de laquelle on peut s'en assurer. On sus-

pend, par un fil de soie ou de chanvre, une petite clochette dans un ballon de verre d'où l'air a été chassé par une pompe pneumatique (fig. 20). On fait sonner la clochette en agitant l'appareil; on n'entend rien. Le battant frappe toujours contre la panse, mais c'est du bruit dans le vide : le son ne parvient pas à se former, à prendre un corps, pour ainsi dire. Si alors on ouvre le robinet qui fermait le ballon et qu'on y laisse rentrer l'air, le charme est rompu et la clochette cesse d'être muette. L'expérience se fait encore avec un réveille-matin que l'on introduit sous le récipient d'une machine pneumatique. Dans le premier moment, on entend fortement résonner le timbre de la sonnerie; mais à mesure que l'air est raréfié, le son s'affaiblit et semble expirer sous l'action de la machine, de sorte que les derniers coups ne s'entendent déjà plus, si le jeu de la pompe a été rapide. On peut même faire partir sous le récipient un petit pistolet de salon chargé à poudre : vous voyez l'éclair sans entendre la détonation. Toutefois, ces expériences ne réussissent qu'à la condition que les corps sonores (le réveille-matin, le pistolet,) soient posés sur un coussin d'ouate qui amortit le choc; sinon, l'ébranlement se transmet au plateau de la machine, et de là à l'air environnant, qui le propage jusqu'à l'oreille. Il est même difficile pour cette raison d'intercepter complètement le son qui tend à se produire dans l'intérieur de la cloche vidée d'air. C'est pour avoir oublié cette cause d'erreur qui naît des communications solides entre le corps sonore et l'air extérieur, que le P. Kircher crut avoir trouvé dans la

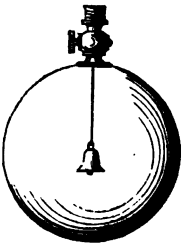


Fig. 20.

même expérience un argument décisif contre l'existence du vide. Il avait fait le vide barométrique dans un tuyau de plomb de 100 pieds, terminé en haut par une ampoule de verre dans laquelle étaient fixés une clochette et un petit marteau qu'un aimant pouvait soulever du dehors. Quand le martelet retombait sur la cloche, elle rendait un son clair et limpide, et Kircher en conclut que ce « vide fantastique » du baromètre n'est qu'une dangereuse fiction des philosophes.

Il est vrai que, pour lui, des corps épais et massifs, tels que des murs ou des rochers, ne peuvent pas transmettre le son d'une manière directe. Comment se fait-il, dit Kircher, que si on frappe sur une muraille, une autre personne entende immédiatement le bruit en appliquant l'oreille du côté opposé? Cette transmission mystérieuse s'explique par la présence de l'air dans les pores de tous les corps ; c'est cet air intérieur qui propage le mouvement sonore. Si un corps est très dense, il ne laisse passer que très peu de son, parce qu'il contient très peu d'air. Le verre est de tous les corps le moins poreux; aussi, un homme enfermé dans une ampoule de verre hermétiquement close, n'entendrait rien dans sa prison, quelque bruit qu'on pût faire au dehors. Kircher ajoute qu'il existe, en Écosse, un rocher appelé la *roche sourde*, parce que ceux qui s'y cachent n'entendent aucun bruit du dehors, pas même la détonation d'un canon; la raison de ce phénomène doit être cherchée, selon lui, dans l'excessive densité de cette roche ; elle est, dit-il, opaque pour le son, tout comme d'autres corps le sont pour la lumière.

S'il est vrai que c'est presque toujours par l'intermédiaire de l'air que les sons parviennent à l'oreille, on sait cependant aujourd'hui que la présence d'un

fluide gazeux n'est pas une condition nécessaire à leur transmission. Tous les corps élastiques : gaz, liquides et solides, propagent le son. Une montre à réveil que l'on enfonce dans l'eau après l'avoir enfermée sous une cloche de verre, s'entend très bien au dehors. Les plongeurs entendent sous l'eau les bruits qui se produisent à la surface. Il est vrai que le son leur arrive très affaibli, mais cela vient d'une perte d'intensité qu'il subit en pénétrant dans un milieu plus dense que l'air. La quantité de mouvement qui a passé dans l'eau s'y propage sans obstacle ; on peut s'en assurer en constatant qu'à la profondeur de quelques mètres on entend aussi bien que tout près de la surface. S'il en était autrement, l'organe de l'ouïe serait un luxe fort inutile chez les poissons, Or il est certain qu'ils entendent ; ainsi, on a remarqué que les poissons apprivoisés répondent à l'appel d'un sifflet.

Les corps solides transmettent le son avec une grande facilité. Le tic-tac d'une montre que l'on applique contre une extrémité d'un tronc d'arbre coupé s'entend parfaitement à l'extrémité opposée, non pas parce qu'il y a de l'air dans les pores du bois, mais parce que le bois résonne sous les chocs de la roue d'échappement. Lorsqu'on écoute en appuyant l'oreille par terre, on peut distinguer le bruit du canon à une distance de plus de 40 kilomètres, et le piétinement des chevaux s'entend de très loin comme une espèce de roulement sourd transmis par le sol.

> Scuta sonant, pulsuque pedum tremit excita tellus.
>
> VIRGILE.

On peut rendre cette transmission visible en posant par terre un tambour chargé de petits cailloux : on les

voit danser lorsqu'il passe de la cavalerie à une grande distance. Dans les mines de Cornouailles, on pousse les galeries jusque sous la mer ; on y entend, à travers le plafond de sable, le bruit des flots et celui des galets qui s'entre-choquent. Lorsqu'on creuse des galeries opposées, les mineurs de la mine et de la contre-mine s'entendent à travers le sol, et peuvent ainsi se diriger l'un sur l'autre. Ces bruits souterrains ont quelquefois donné lieu à des histoires de revenants.

Il paraît que le bois est de tous les corps solides celui qui conduit le mieux le son. Le sapin est, sous ce rapport, préférable au buis, le buis au chêne, etc. Avec quatre perches de sapin. M. Wheatstone a réussi à conduire, à travers plusieurs étages d'une maison, un concert donné dans la cave. Les perches, d'environ $0^m,02$ d'épaisseur, étaient appuyées par leurs extrémités inférieures, l'une sur la table d'harmonie du piano, une autre sur le chevalet du violon, la troisième sur celui du violoncelle, et la quatrième sur la base de l'anche de la clarinette ; elles traversaient la voûte de la cave où étaient les instruments et pénétraient jusque dans l'étage élevé où se tenaient les auditeurs. Chaque tringle se terminait par une tablette renforçante en bois mince et élastique. Tout ce système vibrait énergiquement lorsqu'on attaquait dans la cave un morceau de musique, et à l'étage supérieur la chambre se remplissait de sons qui semblaient sortir des planchettes ensorcelées. Cette expérience est d'un effet magique : le bois chante tout à coup comme s'il était animé, on se croirait au milieu d'un orchestre véritable, n'était le témoignage des yeux..... M. Kœnig fait la même expérience avec une boîte à musique cachée dans une grande caisse ouatée à l'intérieur. Une longue tringle de bois traverse le dessus

de la boîte et se termine par une planchette carrée. Lorsqu'on enlève la planchette, on n'entend rien, mais dès qu'on l'appuie sur l'extrémité libre de la tringle, on entend très distinctement l'air que joue la boîte à musique.

Les parties osseuses de la tête conduisent le son à l'oreille avec une facilité très grande. On peut ainsi entendre par le front, les dents, etc. Deux personnes qui parlent très bas en tenant entre leurs dents les deux extrémités d'une longue tige de bois ou d'un fil tendu, s'entendent à une distance considérable; le résultat est le même si la personne qui parle appuie la tige sur sa gorge ou sur sa poitrine. C'est sur les mêmes principes que repose le *stéthoscope*, inventé par Laennec en 1819; il se compose essentiellement d'un cylindre de bois que le médecin appuie sur la poitrine du malade, afin de mieux entendre les bruits du cœur; cela s'appelle *ausculter*.

Lorsqu'on frappe sur une cuiller d'argent, un timbre de verre ou tout autre corps sonore suspendu à un fil dont on introduit l'extrémité libre dans le conduit auditif (on peut aussi la saisir entre les dents et se boucher les oreilles), on entend un son grave et plein, comme celui d'un bourdon éloigné[1]. Un médecin danois, Herhold, a fait cette expérience avec une cuiller attachée à un fil d'une longueur de 200 mètres, dont une extrémité était fixée à un pieu pendant qu'on tenait l'autre avec les dents.

Les sourds-muets entendent très bien par les dents quand la surdité ne provient pas d'une paralysie du

1. Dès 1667, Robert Hooke parle de la transmission du son par un fil tendu.

nerf acoustique. On leur fait saisir avec les dents les bords d'une boîte à musique ou l'extrémité d'une baguette appuyée sur la table d'harmonie d'un piano, et ils entendent alors les sons de ces instruments. Une personne qui a l'oreille dure comprend très bien ce qu'on lui dit, si l'on parle dans un bassin de cuivre ou dans

Fig. 21. Téléphone.

un verre sur le bord duquel elle appuie l'oreille ou les dents.

Les corps mous, tels que l'étoupe, la ouate, les étoffes en général, la farine, la sciure de bois, ne transmettent pas les sons d'une manière sensible. Un tapis de Smyrne étouffe le bruit des pas ; une épaisse portière empêche les paroles de pénétrer du salon dans l'antichambre.

C'est ici le lieu de parler du *téléphone*, qui depuis

quelques années se pose en rival du télégraphe électrique. Dès 1860, le physicien Reiss avait construit, sous ce nom, un appareil qui transmettait des sons musicaux à une grande distance, en utilisant un phénomène découvert par l'Américain Page (les vibrations sonores que des aimantations rapides provoquent dans

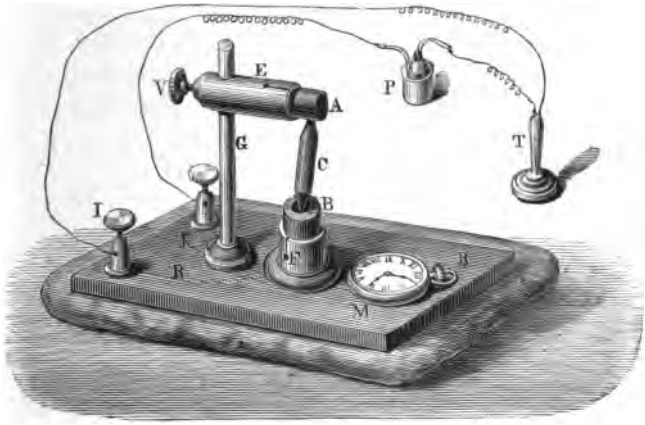


Fig. 22. Microphone.

une tige métallique). Mais le téléphone de M. Graham Bell transmet la parole. L'appareil (fig. 21) se compose d'un manche de bois qui renferme un petit barreau aimanté, entouré d'une bobine magnétique, en avant duquel est fixé un disque de fer très mince. En parlant devant l'embouchure du téléphone, on fait vibrer le disque ; ses mouvements font naître dans la bobine des courants d'induction qu'un fil télégraphique propage jusqu'à un second appareil semblable, dont le disque reproduit alors les vibrations et les rend sensi-

bles à l'oreille. Les physiciens ne sont pas encore tout à à fait d'accord sur l'explication des effets qu'on obtient ainsi, et je me bornerai, pour ce qui concerne l'historique de la question et la théorie de l'appareil, à renvoyer le lecteur au livre de M. le comte Du Moncel[1]. On y trouvera aussi la description détaillée des instruments auxquels M. Hughes a donné le nom de *microphone*, et qui sont destinés à grossir démesurément des bruits faibles, à peine perceptibles à l'oreille nue. Depuis quatre ou cinq ans que ces appareils merveilleux ont fait leur apparition, on les voit se perfectionner sans cesse entre les mains d'une foule de chercheurs, et l'on ne sait où s'en arrêteront les applications.

1. *Le Téléphone, le Microphone et le Phonographe*, par M. le comte Th. Du Moncel. Paris 1878. Hachette (*Bibl. des Merveilles*).

IV

INTENSITÉ DU SON

Circonstances qui font varier l'intensité des sons. — Intensité nocturne. Portée des sons. — Transparence acoustique de l'atmosphère. — Le carré inverse de la distance — Porte-voix. — Tuyaux acoustiques. — Cornet acoustique.

La force ou l'intensité d'un son est primitivement déterminée par la violence du mouvement qui le produit, mais ce qui en parviendra à l'oreille dépend de la nature du milieu où le son se propage. Nous avons déjà vu que sous la cloche d'une machine pneumatique le son d'un timbre s'affaiblit graduellement et semble mourir peu à peu à mesure que l'air y est raréfié. Sur les hautes montagnes, où l'air n'a qu'une faible densité, tous les bruits perdent leur force et semblent plus éloignés qu'ils ne le sont en réalité. Au sommet du Mont-Blanc, à 4800 mètres au-dessus de la mer, Saussure a trouvé qu'un coup de pistolet ne produisait pas plus d'effet qu'un petit pétard dans la plaine. Dans les expériences que la Condamine institua à Quito, entre deux stations élevées de 3000 et de 4000 mètres, le bruit d'une pièce de canon de neuf,

à 20 kilomètres de distance, ressemblait à peine à celui d'une pièce de huit, entendue à 31 kilomètres dans les plaines des environs de Paris. Les aéronautes ont souvent constaté la faiblesse de leur voix dans les régions très élevées de l'atmosphère. Voici ce que M. Glaisher a observé pendant les ascensions qu'il a faites en 1863 avec M. Coxwell. Une fois, il entendit, à 3000 mètres de hauteur, l'aboiement d'un chien et la voix du vent qui mugissait au-dessous de lui. Les cris de plusieurs milliers de personnes avaient cessé d'être entendus à la moitié de cette hauteur. Un autre jour, cependant, le sourd murmure de Londres leur arriva encore à 2 kilomètres d'élévation verticale. Le sifflet d'une locomotive fut entendu dans l'une de ces ascensions, à une hauteur de 6 kilomètres et demi; c'est la plus grande à laquelle une oreille humaine ait perçu des bruits partis de la surface du sol. L'air était ce jour-là exceptionnellement humide.

Lorsqu'on songe à l'affaiblissement que le son éprouve nécessairement dans les régions supérieures de l'atmosphère, on est stupéfait de l'intensité du bruit que produit quelquefois l'explosion d'un bolide. Un météore qui fut observé en 1719 et qui, d'après les calculs de Halley, traversa l'air à une hauteur de plus de 100 kilomètres, donna lieu à une détonation comparable à celle d'une pièce de gros calibre; elle fit trembler les portes et les fenêtres, et à l'observatoire de Greenwich une lunette tomba de sa niche et se brisa sur le sol. Beaucoup de bolides éclatent avec un bruit semblable au roulement du tonnerre, et nous savons que l'explosion a généralement lieu à une très grande hauteur au-dessus de la surface terrestre. Il faut donc que ces détonations se fassent avec une violence inouïe.

Dans l'air comprimé, le son est considérablement renforcé, et l'audition y est exagérée. Dans les tubes où travaillaient les ouvriers employés à la fondation du pont d'Arcueil, tous les sons prenaient un timbre métallique qui ébranlait le cerveau; quand on y parlait, on se sentait la base du crâne vibrer comme une trompette. Un autre effet non moins désagréable de la tension de l'air comprimé était la résistance qu'il opposait au mouvement des lèvres; on y perdait le siffler, on bégayait, John Roebuck a également constaté la grande intensité des sons dans les soufflets d'un haut fourneau du Devonshire.

Priestley a fait des expériences avec des gaz autres que l'air. Ayant rempli d'hydrogène une cloche sous laquelle était une sonnerie, il constata que le bruit du timbre cessait presque d'être entendu. On sait que la densité de l'hydrogène est 14 fois moindre que celle de l'air. Pilatre de Rozier ayant aspiré de grandes quantités de ce gaz trouva que sa voix était faible et nasillarde. Maunoir et Paul ont fait la même expérience à Genève; ils disent que leurs voix sont devenues grêles et flûtées d'une manière effrayante.

Dans l'eau les sons se propagent avec beaucoup de force. D'après les expériences qu'il avait faites sur le lac de Genève, Colladon estima qu'on pourrait communiquer en mer, par le moyen d'une cloche submergée, à des distances de quelque cent kilomètres. Franklin rapporte qu'il a entendu le choc de deux cailloux dans l'eau à plus d'un demi-mille anglais (800 mètres).

Quand le son passe d'un milieu dans un autre d'une densité différente, il éprouve une perte d'intensité plus ou moins sensible, sans doute par suite des réflexions qui ont lieu à la surface de séparation des deux milieux.

J'ai déjà dit que les plongeurs n'entendent que faiblement les bruits qui viennent de la surface, tandis qu'on entend très bien au dehors les bruits qui sortent de l'eau : un coup frappé sur la cloche à une profondeur de 10 mètres est parfaitement perçu à la surface. On en conclut que l'eau transmet plus facilement les vibrations à l'air que l'air ne les transmet à l'eau. Si les vibrations d'un corps solide, au lieu de se propager directement dans l'air, y arrivent par l'intermédiaire d'un liquide, elles conservent une plus grande énergie. Pérolle a fait, à ce sujet, une série d'expériences. Il prit une montre de poche, et l'ayant calfatée avec de la cire, la plongea, suspendue à un fil, dans un vase qu'il remplit successivement de divers liquides. Dans l'air, le tic-tac de la montre cessait d'être perceptible à une distance de 3 mètres. Les liquides renforcèrent le son; plongée dans l'esprit-de-vin, la montre s'entendait encore à 4 mètres, dans l'huile à 5, dans l'eau à 7 mètres. On voit que la portée du son augmentait avec la densité du liquide par l'intermédiaire duquel il ébranlait l'air.

Les vibrations d'un corps solide se transmettent difficilement à un milieu gazeux; il faut lui donner une grande surface pour en augmenter le son. Un diapason résonne plus fortement s'il est appuyé sur une tablette de bois qu'il ébranle et qui, à son tour, fouette une masse considérable d'air. C'est pour la même raison que, dans l'expérience de M. Wheatstone, rapportée plus haut, les tringles de bois étaient munies de planchettes offrant une certaine surface.

Quand le son se propage dans l'air de haut en bas ou de bas en haut, il traverse aussi des couches d'inégale densité, Saussure et Schultes ont constaté que le

son parvient plus facilement de la base au sommet d'une montagne élevée que du sommet à la base. Les aéronautes ont fait une remarque analogue. Pour l'explication de ces faits, il est essentiel de faire observer que la voix et tout autre son ont déjà, au moment de leur production, moins de force dans l'air raréfié des hautes régions de l'atmosphère que dans l'air plus dense de la plaine.

Quand l'air inégalement échauffé par le soleil et par le rayonnement du sol cesse d'être homogène, le son doit y perdre beaucoup de sa force, par suite des réflexions intérieures, et se propager moins loin[1]. C'est par cette circonstance que Humboldt explique la différence d'intensité des sons pendant le jour et pendant la nuit. Nicholson cherche l'explication de ce fait dans l'absence pendant la nuit, des mille bruits confus, qui, pendant le jour, agitent l'atmosphère autour de nous. Le silence de la nuit, dit-il, repose nos organes et les rend plus sensibles à de faibles impressions ; le silence exalte l'ouïe comme l'obscurité aiguise la vue. Les coups de dents d'une souris résonnent la nuit bien autrement que le jour. L'obscurité même y est peut-être pour quelque chose. Pour mieux entendre, on ferme les yeux ; le sens de l'ouïe est généralement très développé chez les aveugles.

Humboldt oppose à cette opinion ce qu'il a observé en Amérique. Dans les pays tropicaux, les animaux font plus de vacarme pendant la nuit que pendant le jour, et le vent ne s'élève qu'après le coucher du soleil. Néan-

1. Lorsqu'on a établi la ventilation des deux palais du parlement de Londres, on a constaté que le courant d'air qui montait du milieu des salles au plafond rendait inintelligible la voix d'un orateur placé du côté opposé.

moins, le bruit des cataractes de l'Orénoque s'entend à Aturès (à plus d'une lieue) avec trois fois plus de force la nuit que le jour. Humboldt a remarqué en outre que l'accroissement nocturne de l'intensité du son est plus sensible dans les plaines basses que sur les plateaux, et sur la terre ferme que sur la mer.

Les importantes recherches de M. Tyndall concernant la portée des signaux sonores ont tout récemment répandu sur cette question un jour nouveau; avant d'en indiquer les résultats, il convient de mentionner encore quelques faits connus.

Le froid semble augmenter la portée des sons. Dans les régions polaires, le capitaine Parry entendit souvent à la distance d'un mille (1600 mètres) une conversation à voix ordinaire. Foster, l'un des compagnons de Parry, rapporte qu'à Port-Bowen il a pu converser avec un homme de l'équipage à 2040 mètres de distance, par un froid de 28° au-dessous de zéro. On pourrait croire que ce phénomène est dû à la condensation de l'air; mais les expériences de MM. Bravais et Martins ne confirment pas cette opinion. Ces deux observateurs ont d'abord constaté, à Saint-Chéron (Seine-et-Oise), qu'un diapason s'entendait à 254 mètres à une heure de l'après-midi, et jusqu'à 379 mètres à minuit. Sur le Faulhorn, le son parvenait à 550 mètres à minuit, sur le Mont-Blanc encore à 337 mètres, et pourtant l'air est bien moins dense sur ces hauteurs que dans la plaine.

On s'est enfin occupé de l'action du vent sur l'intensité du son. De Haldat a fait quelques expériences dans les environs de Nancy avec un petit timbre; il a trouvé que le son était entendu deux ou trois fois plus loin au-dessus du vent que sous le vent. Plus tard, en 1813,

Delaroche et Dunal ont fait des mesures plus précises dans la plaine d'Arcueil. Ils se plaçaient entre deux timbres égaux qui étaient frappés avec la même force, et cherchaient le point où les deux sons paraissaient de même intensité quand la ligne droite menée d'un timbre à l'autre faisait avec la direction du vent tel ou tel angle. Alors le son le plus affaibli était évidemment celui qui émanait du timbre le plus rapproché. On trouva de cette façon que, pour les distances au-dessous de 6 mètres, l'influence du vent était insensible, qu'elle devenait appréciable pour des distances plus grandes et qu'elle croissait avec ces distances. Elle était plus marquée pour les sons faibles. Un vent contraire affaiblissait le son, mais tout autre vent l'affaiblissait aussi, quoique à un moindre degré. Par un air calme, ou dans une direction perpendiculaire à la ligne du vent, le son s'entendait toujours plus loin. L'agitation de l'air est donc toujours nuisible à la propagation du son. Derham avait déjà fait une observation analogue à Porto-Ferrajo (île d'Elbe); il avait remarqué que le canon de Livourne s'entendait mieux quand l'air était calme que lorsqu'il faisait du vent, même quand le vent venait de Livourne; la distance est de 25 lieues.

Le baron de Zach dit qu'à l'observatoire de Seeberg, qui a une position élevée et fort isolée, le son des cloches des églises voisines, le bruit des moulins, l'aboiement des chiens et les voix des hommes montaient jusqu'à lui d'une manière très distincte pendant les nuits où les images des astres se montraient bien tranquilles, tandis qu'il n'entendait presque rien quand les étoiles tremblotaient dans le champ de la lunette; la force du son peut donc, jusqu'à un certain point, indiquer l'état de l'atmosphère.

En 1873, des expériences sur la portée des signaux

sonores ont été entreprises en Angleterre par une commission à la tête de laquelle était M. Tyndall. Deux stations furent établies au pied et au sommet du rocher de South-Foreland, dans le voisinage de Douvres. Les instruments étaient d'abord des trompettes de $3^m,40$ de longueur, dont on faisait résonner les anches par l'air comprimé, et des sifflets à vapeur, puis une belle sirène à vapeur américaine, munie d'un pavillon de 5 mètres de longueur. M. Tyndall, monté sur un bateau à vapeur que le gouvernement avait mis à sa disposition, s'éloignait ou se rapprochait de la côte, cherchant la distance jusqu'à laquelle les signaux étaient perceptibles à l'oreille. Les trompettes furent toujours entendues plus loin que les sifflets, les coups de canon (tirés de Dover-Castle) plus loin que les trompettes ; les sirènes produisaient le plus d'effet. Contre toute attente, la brume et et même la pluie, loin d'étouffer le son, en augmentaient la portée. Tel jour, les trompettes s'entendaient jusqu'à 20 kilomètres par la brume et un *vent contraire*, tandis que la portée n'était parfois pas de 4 ou 5 kilomètres par un ciel serein et une atmosphère optiquement pure.

La conclusion à laquelle s'arrête M. Tyndall, c'est que la vapeur d'eau qui s'élève de la mer et se répand dans l'air y forme des *nuages acoustiques* capables d'intercepter le son. Ce qui confirme cette hypothèse, c'est que l'air optiquement transparent, mais acoustiquement opaque, réfléchissait les sons et les renvoyait en arrière, produisant des échos multiples qui duraient de 8 à 15 secondes et semblaient venir de murs invisibles. Ces résultats ont encore été corroborés par des expériences de laboratoire où une couche d'air, rendue opaque pour le son par des jets de gaz (ou bien par un écran

d'étoffe légère) renvoyait en même temps les ondes sonores qu'elle interceptait. Une flamme sensible (fig. 54) servait à rendre ces effets visibles à l'œil, et à constater la direction où le son était renvoyé.

D'après M. Tyndall, ces observations permettraient de rendre compte d'un fait assez embarrassant qui a été noté lors des expériences instituées en 1822 pour la mesure de la vitesse du son. Les coups de canon de Montlhéry étaient accompagnés d'un roulement semblable à celui du tonnerre et qui durait de 20 à 25 secondes ; rien de pareil à Villejuif. Tous les coups de Montlhéry étaient entendus à Villejuif, tandis que les coups de Villejuif ne parvenaient que rarement à Montlhéry. Ces différences s'expliqueraient en admettant que Villejuif, étant situé à proximité de Paris, se trouve constamment enveloppé de nuages acoustiques.

M. Philippe Breton a fait remarquer que l'affaiblissement des sons observé par M. Tyndall pourrait aussi tenir à une déviation des ondes sonores dans le sens vertical, qui serait due à la stratification régulière des couches atmosphériques inégalement chauffées, et qui laisserait certaines régions plongées dans « l'ombre de silence. » Mais ces vues théoriques auraient besoin d'être contrôlées par des expériences directes.

Ce qui a toujours rendu ces sortes d'observations très difficiles, c'est qu'on n'a aucun instrument pour mesurer l'intensité du son, et qu'on est obligé de se fier au jugement de l'oreille. Or, la sensibilité de l'ouïe peut varier d'un jour à l'autre, elle n'est pas la même chez deux personnes différentes ; souvent la même personne entend mieux d'une oreille que de l'autre. Enfin, ce qui est surtout fâcheux, l'organe de l'ouïe est plus fortement impressionné par les notes aiguës que par

les notes graves. On aurait pu croire que l'intensité apparente d'un son devait être proportionnelle à la force mécanique qui le produit, il n'en est rien. Lorqu'on fait tourner une sirène sous une pression d'air constante, les sons graves qu'elle émet au commencement sont beaucoup plus faibles que les notes aiguës qui se produisent quand le disque tourne de plus en plus vite. Enfin M. Kœnig a constaté qu'à amplitude d'oscillation égale le son d'un diapason grave a bien moins d'intensité que celui d'un diapason aigu.

La sensibilité de l'oreille augmente avec la hauteur des notes; on a, en outre, constaté que les notes très aiguës comprises de *mi* à *sol* résonnent dans l'oreille avec une force tout exceptionnelle. Il est donc certain que l'on ne saurait comparer à l'aide de l'oreille que des sons de même hauteur. Si on voulait essayer de créer une mesure absolue de l'intensité des sons, voici comment on pourrait s'y prendre. Le *phonomètre* serait un instrument donnant des sons d'une force toujours la même au moyen d'une soufflerie à pression constante. On chercherait la distance à laquelle un son du phonomètre paraîtrait aussi fort que celui dont on aurait à déterminer l'intensité. Alors cette intensité serait à celle du son type dans le rapport inverse du carré des distances du phonomètre et de la source sonore.

Tout mouvement qui rayonne librement en tous sens : lumière, électricité, chaleur ou son, se répand à partir du point d'origine sur des sphères concentriques. Or, la surface de ces sphères croissant toujours comme le carré du rayon, il s'ensuit que l'intensité de la force émanée du centre doit diminuer dans le même rapport à mesure qu'elle se distribue sur les sphères successives. Donc, l'intensité d'un rayonnement décroît sans

cesse à partir du centre ; elle est, en un point quelconque, en raison inverse du carré de la distance.

C'est la loi qui régit aussi la gravitation ; toutes les forces attractives ou répulsives lui sont soumises. La théorie nous dit qu'elle doit également s'appliquer au son. Delaroche et Dunal l'ont vérifiée de la manière suivante. S'étant procuré cinq timbres parfaitement identiques, ils en placèrent un à une extrémité d'une ligne droite mesurée sur le terrain, et les quatre autres à l'extrémité opposée. Ils cherchèrent alors le point où le son qui arrivait du timbre isolé offrait la même intensité que celui que rendaient les quatre timbres frappés simultanément. Ce dernier son devait être, à distance égale, quatre fois plus fort que le premier. On trouva qu'il devenait égal à celui-ci, que par conséquent il n'avait plus que le *quart* de son intensité normale, lorsque l'observateur se plaçait deux fois plus loin du groupe de quatre timbres que du timbre isolé. La loi se trouvait donc exacte.

La portée des sons, ou la distance à laquelle l'oreille peut encore les distinguer, représente en quelque sorte la mesure de leur intensité. La voix humaine s'entend quelquefois très loin. Nous avons déjà mentionné que, dans les régions polaires, Foster a pu tenir une conversation avec une autre personne à 2,040 mètres de distance. Nicholson rapporte que, sur le pont de Westminster, à Londres, on entend très bien, pendant la nuit, les voix des ouvriers qui travaillent dans les fabriques de Battersea, éloignées de 5 kilomètres. Le même auteur nous apprend que les cris des sentinelles de Portsmouth sont entendus, pendant la nuit, à Ride, dans l'île de Wight ; la distance est de 7 ou 8 kilomètres. Le rire des matelots d'un navire de guerre anglais, stationné à

Spithead, parvint jusqu'à Portsmouth, c'est-à-dire à 4 kilomètres. On a peine à croire ce que Derham a dit avoir constaté à Gibraltar, où la voix humaine aurait été entendue à plus de 10 milles anglais (16 kilomètres). Telle était tout au plus la voix de Stentor, qui, au dire d'Homère, criait comme cinquante hommes[1]. D'après Hinrichs, les instruments de cuivre d'un orchestre russe s'entendaient à plus de 7 kilomètres. Le tambour battant la retraite au château d'Edimbourg fut entendu un jour à plus de 30 kilomètres.

Le bruit du canon se propage très loin parce qu'il fait trembler le sol. La canonnade de Florence fut entendue au delà de Livourne, c'est-à-dire à une distance d'environ 90 kilomètres, et celle de Gênes en mer à 165 kilomètres. En 1792, le canon de Mayence fut entendu à Eimbeck, petite ville éloignée de 245 kilomètres. En 1809, les coups de canon tirés à Heligoland étaient entendus à Hanovre (260 kilomètres); enfin, le 4 décembre 1832, le canon d'Anvers fut entendu en Saxe, dans les montagnes de l'Erzgebirge, dont la distance est de près de 600 kilomètres ! L'éruption du volcan Saint-Vincent, qui eut lieu en 1815 se fit entendre jusqu'à Demerary, sur une distance de 300 milles marins (550 kilomètres).

Pour augmenter la portée de la voix, on fait usage d'un instrument nommé *porte-voix* (en anglais *speaking trumpet*, en latin *tuba stentorea*). C'est le plus ordinairement un tube conique (fig. 23), muni d'une embouchure qui s'applique sur la bouche sans gêner le mouvement des lèvres, et terminé par un pavillon évasé. On s'en sert beaucoup en mer pour se faire

1. Hom., *Il.*, V, 785.

entendre à une grande distance malgré le vent et les flots; le guet avait jadis un porte-voix pour annoncer les incendies du haut de sa tour; à la campagne on l'emploie pour appeler les ouvriers qui travaillent dans les champs.

Le porte-voix a été inventé vers 1670 par le chevalier Samuel Morland, qui fit exécuter plusieurs modèles d'abord en verre, puis en cuivre, et qui rendit le roi

Fig. 23. Porte-voix.

Charles II et le prince Robert témoins des effets surprenants qu'il obtenait avec sa trompette d'un nouveau genre. Dans une expérience qui fut faite à Deal, avec un cône de $1^m,68$ de longueur, dont les deux ouvertures avaient respectivement $0^m,05$ et $0^m,53$ de diamètre, on put se faire entendre à une distance de 5 kilomètres.

Quand l'invention de Morland fut publiée, le P. Athanase Kircher la revendiqua aussitôt, sous prétexte qu'il avait déjà employé des tubes de forme conique; mais il est facile de voir que, dans ses écrits antérieurs, le savant jésuite n'a voulu parler que de tubes acoustiques. Kircher donne aussi à cette occasion une description du *cor d'Alexandre le Grand*, d'après un vieux manuscrit intitulé *Secreta Aristotelis ad Alexandrum Magnum*, qui existait à la bibliothèque du Vatican. Ce cor, dont nous reproduisons la figure, permet-

tait à Alexandre, toujours d'après l'auteur inconnu du manuscrit, de rappeler ses soldats lorsqu'ils s'étaient éloignés de 100 stades (18 kilomètres). Le diamètre de l'anneau aurait été de 5 coudées ($2^m,40$). Le P. Kircher conjecture que pour en faire usage on le soutenait par trois perches. Vers la fin du siècle dernier, un physicien allemand, le professeur Huth, a voulu se rendre compte des effets d'un pareil instrument. Il a fait construire un modèle en tôle, de dimensions un peu moindres que celles qui sont indiquées par Kircher; et il a trouvé qu'un cor de cette forme représente un porte-voix d'un effet considérable, surtout lorsqu'il est muni d'un pavillon évasé. Le moine Salar, de l'ordre des augustins, avait fait construire le cor d'Alexandre à Paris, dès 1654, mais nous ne connaissons pas le résultat qu'il obtint. Dans tous les cas, cette expérience n'eut pas de suite.

Peu de temps après la publication de l'invention de Morland, Cassegrain proposa de donner au porte-voix une forme hyperbolique; Conyers le transforma en paraboloïde, et Jean-Mathieu Hase le composa d'un ellipsoïde comme embouchure et d'un paraboloïde employé comme pavillon. Tous ces projets, que l'expérience n'a pas justifiés, supposent que le renforcement des sons dans le porte-voix est dû à la réflexion intérieure des ondes sonores. Cette idée a été developpée par Lambert dans sa théorie du porte-voix, publiée en 1763, qui a passé dans presque tous les traités de physique. On pose en principe que le but de l'instrument est de rendre les rayons sonores parallèles à l'axe du tube, et l'on cherche la forme la plus propre à réaliser ce parallélisme. Rien n'est moins conforme aux faits observés.

D'après la théorie des réflexions, un tube cylindriqu serait sans effet. Or Hassenfratz a constaté qu'il n'en est pas ainsi. Le tic-tac d'une montre qui, dans les circonstances ordinaires, cessait d'être entendu à $1^m,01$ de distance, se distinguait encore à $2^m,25$ lorsqu'on plaçait la montre à une extrémité d'un tube cylindrique

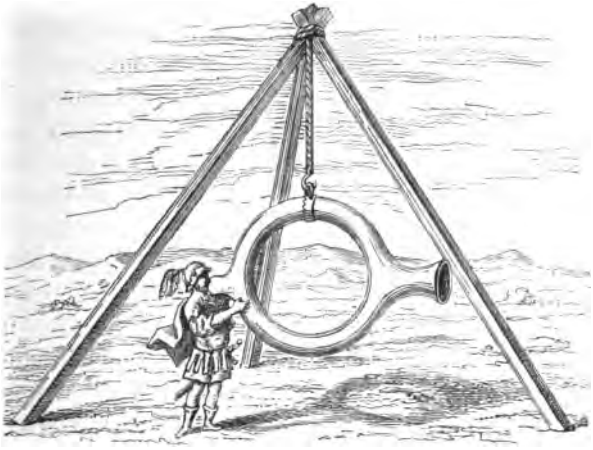


Fig. 24. Cor d'Alexandre le Grand.

de $0^m,60$ de longueur et de $0^m,04$ de diamètre. Un tube cylindrique, muni d'un pavillon évasé, peut très bien servir comme porte-voix.

Lambert avait trouvé que le pavillon était un accessoire inutile. L'expérience prouve le contraire : le pavillon contribue d'une manière évidente au renforcement du son.

Enfin, Hassenfratz a constaté qu'en doublant d'une étoffe de laine l'intérieur d'un porte-voix en cuivre, il

n'en diminuait l'effet que d'une manière à peine sensible. Or le revêtement de laine devait empêcher toute réflexion sur les parois intérieures du tube.

Il résulte de ces faits que le renforcement du son dépend uniquement de la forme géométrique de la colonne d'air d'où part la première impulsion. Comment cette influence s'exerce-t-elle ? C'est ce que la théorie ne nous a pas encore révélé. On peut seulement dire que le tube du porte-voix contient les ondes sonores, les empêche de se disperser trop tôt en tous sens, leur permet de se consolider ; c'est cette idée qui nous guide instinctivement quand nous nous faisons un porte-voix de nos deux mains. Les anciens adaptaient aussi aux masques des acteurs une espèce de pavillon formant porte-voix.

Le porte-voix, d'ailleurs, ne renforce pas le son dans la direction de son axe seulement ; l'effet s'observe dans tous les sens à la fois. Ainsi lorsqu'on parle dans un porte-voix, à une certaine distance d'un mur élevé, on obtient un écho presque aussi fort quand le pavillon est tourné du côté du mur que lorsqu'il est tourné du côté opposé.

Les tubes qui sont en usage à bord des navires ont rarement une longueur qui dépasse 2 mètres, avec $0^{m},30$ d'ouverture. En Angleterre, on en a fait d'une longueur de plus de 7 mètres, qui portaient la parole à une distance de plus de 4 kilomètres; lorsqu'il s'agit seulement de faire entendre un cri inarticulé, un bon porte-voix s'entend jusqu'à 5 ou 6 kilomètres. Il serait intéressant de faire sur ce sujet des expériences plus complètes.

En Angleterre et en Amérique, on s'est beaucoup occupé des moyens d'avertir les navires qui passent au

large par les temps de brouillard, où les feux des phares cessent d'être visibles. Le plus souvent on se sert à cet effet d'une cloche. La cloche de l'île Copeland, dans la mer d'Irlande, est mise en branle par une machine ; on dit qu'elle se fait entendre jusqu'à 24 kilomètres de distance. A Boulogne, on a une cloche installée au foyer d'un réflecteur parabolique ; trois marteaux, mus par un poids qui descend, la frappent alternativement. A bord de quelques-uns des phares flottants, on emploie des tam-tam ou des canons. En Amérique, on a établi des sirènes à vapeur, munies d'un pavillon de 5 mètres, à Staten-Island, à Sand Hook, etc. C'est un des moyens les plus puissants que l'on connaisse. A l'île des Perdrix (Nouveau-Brunswick), on a fait usage d'un sifflet à vapeur. Aux Skerries, près Holyhead, on protège, autant que possible, les oiseaux de mer dont les cris peuvent avertir les bâtiments ; malheureusement, des rats échappés du *Régulus*, qui fit naufrage dans cette partie du canal Saint-Georges vers 1856, se sont multipliés dans l'île et travaillent à la destruction des oiseaux. On a essayé d'un chat, mais l'on s'est aperçu bientôt qu'il faisait cause commune avec les rats, et qu'il leur préférait les oiseaux.

Pour faire distinguer les signaux des différentes stations, on peut employer des sons intermittents, ou une succession de notes différentes. M. Cowper et M. Holmes ont proposé pour cet usage des trompettes à vapeur ; le capitaine Ryder veut combiner un canon avec un sifflet. Peut-être serait-il possible de propager un son très intense à travers l'eau même ; pour l'entendre, les marins plongeraient dans l'eau un long cornet acoustique comme celui que Colladon employa sur le lac de Genève : ils pêcheraient en quelque sorte le son. Præto-

rius a inventé un instrument analogue pour la terre ferme: c'est une espèce de pelle qu'on enfonce dans le sol; on applique l'oreille au manche, dont le frémissement trahit l'approche de l'ennemi. L'inconvénient de ces moyens, c'est qu'ils n'indiquent nullement la direction d'ou vient le bruit.

Quand le son se propage dans une masse d'air limitée, il ne perd que très peu de sa force. Les tubes acoustiques nous en offrent un exemple frappant. Ce sont de longs tuyaux de métal ou de caoutchouc à l'aide des quels on peut tenir une conversation à distance. On s'en sert dans beaucoup de maisons pour communiquer à travers plusieurs étages, à bord des navires pour parler au gabier quand il est dans sa hune, etc. Quelqu'un a même proposé de tirer parti des tubes acoustiques, combinés avec des sonnettes électriques, pour remplacer les portiers par une communication directe avec tous les étages de la maison.

Dans les expériences que Biot a faites sur la propagation du son dans les tuyaux des aqueducs de Paris, il s'est trouvé que les sons les plus faibles se transmettaient parfaitement à travers une colonne d'air de 950 mètres de longueur, « de sorte, dit-il, que pour ne pas s'entendre, il n'y aurait eu qu'un moyen, celui de ne pas parler du tout. » Lorsqu'on tirait un coup de pistolet à une extrémité du conduit, l'air était chassé du dernier tuyau avec assez de force pour produire sur la main un vent impétueux, pour lancer à plus d'un demi-mètre des corps légers et pour éteindre des bougies allumées.

Dans les foires, on était toujours sûr autrefois de rencontrer *l'oracle de Delphes*, simple tête de Turc qui répondait très bien aux demandes qu'on lui adressait

en lui parlant à l'oreille. Ces effets étaient obtenus par l'emploi d'un tube acoustique caché dans le piédestal de l'appareil et communiquant avec une pièce où se tenait un compère. Ce qu'on a vu de plus ingénieux dans ce genre, c'est la *femme parlante* du gendre de M. de Kempelen. Une femme à tête de cire était assise sur une chaise que l'on plaçait tour à tour dans deux endroits différents de la salle où l'on recevait les curieux. On lui parlait à l'oreille, la réponse semblait sortir de la bouche. Voici comment s'obtenait ce résultat. Un tuyau acoustique qui débouchait dans le creux de la tête de cire traversait l'un des pieds de la chaise. Deux autres tubes qui partaient d'une pièce voisine débouchaient sous le plancher de la salle, en deux points marqués chacun par un petit clou. Dans le voisinage de ces points, le plancher avait été usé en dessous, de manière à ne plus former qu'une très mince cloison, et percé d'un très petit trou. On avait soin de placer la chaise de telle sorte que le pied qui était creux vînt se poser près de l'un des deux clous.

La *femme invisible* qui excita, au commencement de ce siècle, une si grande sensation dans les principales villes du continent, s'explique d'une manière tout aussi simple. L'organe le plus apparent de cette machine (fig. 25) était une sphère creuse, munie de quatre appendices en forme de trompettes, et suspendue librement à un support en fil de fer, ou bien au plafond de la chambre, par quatre rubans de soie. Cette sphère était entourée d'une cage en treillis soutenue par quatre piliers, dont l un était creux et communiquait avec le sol. Le tube acoustique qui y passait débouchait au milieu de l'une des traverses horizontales supérieures, où il y avait une fente très étroite, à peine perceptible

à l'œil, faisant face à l'orifice de l'une des quatre trompes. La voix semblait alors sortir de la sphère. Il est probable que la personne qui se tenait dans la pièce voisine et qui donnait les réponses, pouvait voir par une fente dans le mur ce qui se passait dans la salle. Les demandes se faisaient en parlant dans l'orifice de l'une des trompes.

Les cheminées, les conduites de gaz, les calorifères propagent le son d'une manière remarquable. Lorsqu'on applique l'oreille au foyer de certaines cheminées, on entend distinctement tous les bruits du dehors. Dans les prisons et dans les maisons de fous on évite d'établir des tuyaux de conduite le long des murs, parce qu'ils pourraient permettre aux prisonniers de communiquer les uns avec les autres, et troubler les malades dont la folie est douce, en faisant arriver jusqu'à eux le bruit que font les fous furieux.

A Carisbrook-Castle, près de Newport, il existe un puits remarquable par ses propriétés acoustiques. Lorsqu'on y laisse tomber une épingle, on entend distinctement le choc qu'elle produit en frappant la surface de l'eau. Le diamètre de ce puits est de 3 mètres et demi, sa profondeur de 64 mètres.

Dans les faits de ce genre, il est quelquefois difficile de décider quelle est la part pour laquelle la matière des parois contribue à la propagation du son qui marche dans un canal fermé.

La même remarque peut s'appliquer à la transmission du son le long d'une surface unie. Hutton a constaté qu'une personne qui lisait à haute voix était entendue sur la Tamise à une distance de 36 mètres, et à terre seulement jusqu'à 23 mètres. Dans le théâtre Argentino, à Rome, on a remarqué que la voix des ac-

teurs s'entendait beaucoup plus loin depuis qu'on avait construit une conduite d'eau sous le plancher de la salle. Dans ces cas, il est probable que l'eau n'était point sans influence sur la propogation du son.

Sous les coupoles sphériques des églises, on observe souvent des effets d'acoustique vraiment extraordinaires

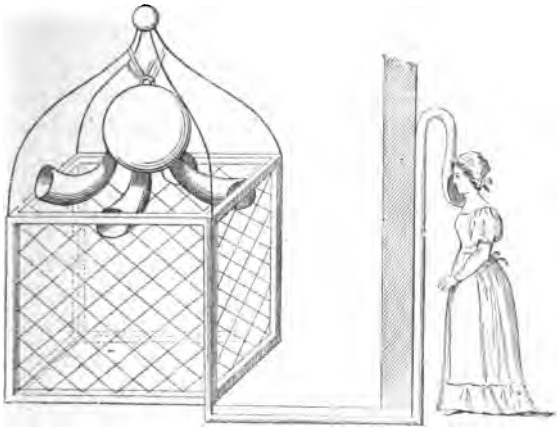


Fig. 25. La femme invisible.

et qui ne s'expliquent pas plus que l'effet du porte-voix par la réflexion des ondes sonores. Ces voûtes semblent guider le son. Ainsi le père Kircher affirme que deux personnes placées en deux points opposés de la large galerie qui fait à l'intérieur le tour de la coupole de Saint-Pierre à Rome, s'entendent parfaitement en parlant à voix basse et sans qu'on puisse les entendre ailleurs. On peut encore citer, à ce sujet, la coupole de Saint-Paul à Londres : une montre, placée près du mur, sur la galerie qui règne à la naissance de la voûte circu-

laire, s'entend distinctement du côté opposé. Dans l'église de Glocester, deux personnes qui se parlent bas sur la galerie à l'est du chœur, s'entendent à une distance de 50 mètres. D'après Brydone, l'église cathédrale de Girgenti offre un phénomène analogue. Quand la grande porte est fermée, tout ce qui se dit à voix basse près de cette porte parvient à l'autre extrémité de la nef, mais l'on n'entend rien au milieu.

Ces effets ne s'expliquent que d'une manière très imparfaite par la réflexion des rayons sonores, à l'aide de laquelle on rend compte des phénomènes des voûtes elliptiques, ainsi que nous le montrerons dans le chapitre suivant. Les surfaces agissent comme si elles guidaient le son. Hutton raconte que le long du mur d'un jardin de Kingston, deux personnes qui parlaient très bas s'entendaient fort bien à 60 mètres de distance. Ces effets sont encore plus saisissants quand le son est guidé par une gouttière demi-cylindrique ou par un autre canal ouvert. Hassenfratz plaça une montre à l'extrémité d'une rigole formée par deux planches assemblées en toit ; il put alors entendre le tictac du balancier à une distance de vingt-cinq pas, tandis que, dans l'air libre, il cessait de l'entendre à plus de deux pas. Quelques édifices offrent cette disposition d'une manière accidentelle. A l'Observatoire de Paris, il existe une salle hexagone dont les angles opposés sont réunis par une sorte de gouttière qui parcourt la voûte ; deux personnes, placées à deux angles opposés, peuvent y causer à voix basse sans être entendues par les assistants. Un vestibule voûté, au bas du grand escalier du Conservatoire des arts et métiers, à Paris, offre la même particularité. Les sons s'y propagent suivant l'arête d'une voûte en arc de cloître et descendent ensuite dans l'angle des murs.

Les effets des *cabinets parlants* reposent sur l'application habile de principes analogues; très souvent ils résultent d'une disposition accidentelle des murs. L'exemple le plus curieux de ces phénomènes d'acoustique nous est offert par *l'oreille de Denys*, dans les carrières de Syracuse, en Sicile. C'est une caverne au fond de laquelle le tyran de Syracuse avait fait construire un

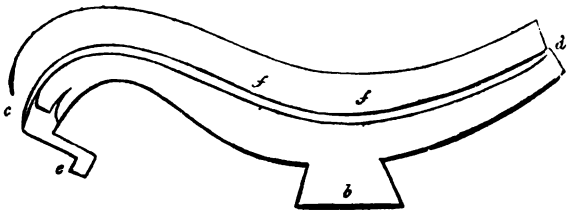


Fig. 26. Plan de l'Oreille de Denys.

cachot pour ses prisonniers, et dans laquelle le son se propage de telle façon que le moindre bruit, la moindre parole s'entendent distinctement à l'entrée du conduit souterrain, où se tenait un gardien. Voici, d'après Kircher, le plan de la caverne. L'entrée est en *c*, le cachot se trouvait en *d*; *ff* est la projection d'une gouttière large de $0^m,75$, creusée au milieu du plafond de la caverne, à 30 mètres au-dessus du pavé : elle se termine en *e*, à la demeure du gardien. *b* est une cavité pratiquée dans la paroi latérale. Le canal *ff* agit comme une sorte de conduit auditif. Il y a longtemps que l'orifice *e* a été muré, et il en résulte que l'antre du roi Denys produit aujourd'hui des effets d'échos très bizarres. Le peuple lui a donné le nom de *grotta della Favella*) grotte de la causerie). Kircher a visité cette caverne. Il rapporte que le moindre son y est renforcé d'une manière pro-

digieuse : un mot prononcé à voix basse devient une clameur, et si on frappe avec la main sur un vêtement, on dirait un coup de canon. Un chant à deux voix est répété de telle façon qu'il vous semble entendre un quatuor. La longueur totale de la caverne est de 15 mètres.

Kircher a imaginé une foule de constructions destinées à imiter l'oreille de Denys. Ce sont de grands tubes recoquillés dont le pavillon est tourné vers l'endroit où se produisent les sons, et qui débouchent par l'autre extrémité dans l'intérieur de l'appartement où — les murs ont des oreilles.

Cela nous amène à parler du *cornet acoustique*, instrument destiné à renforcer les sons en les condensant. On lui donne une infinité de formes, dont la plus simple et la moins efficace est le cône. L'essentiel, c'est que le pavillon extérieur soit plus large que l'orifice que l'on introduit dans l'oreille. On comprend qu'alors le mouvement sonore contenu dans la tranche d'air qui remplit le pavillon se concentre dans des tranches de plus en plus petites, et devient, par conséquent, plus intense en chaque point de l'orifice qu'il ne l'était dans le pavillon.

Vers la fin du dix-septième siècle, on employait des cornets acoustiques qui avaient la forme des cors de chasse. Un des modèles les plus généralement usités est celui que représente le numéro 1 de la figure 28. Une autre forme très employée est celle du numéro 2. Curtis a fait construire des cornets qui pouvaient s'étirer comme les lunettes d'approche (n° 3). Itard a indiqué une série d'autres systèmes. Le premier (n° 4) est une espèce d'ellipsoïde, muni d'un pavillon et d'un tube recourbé qui s'enfonce dans l'oreille ; les lignes pointil-

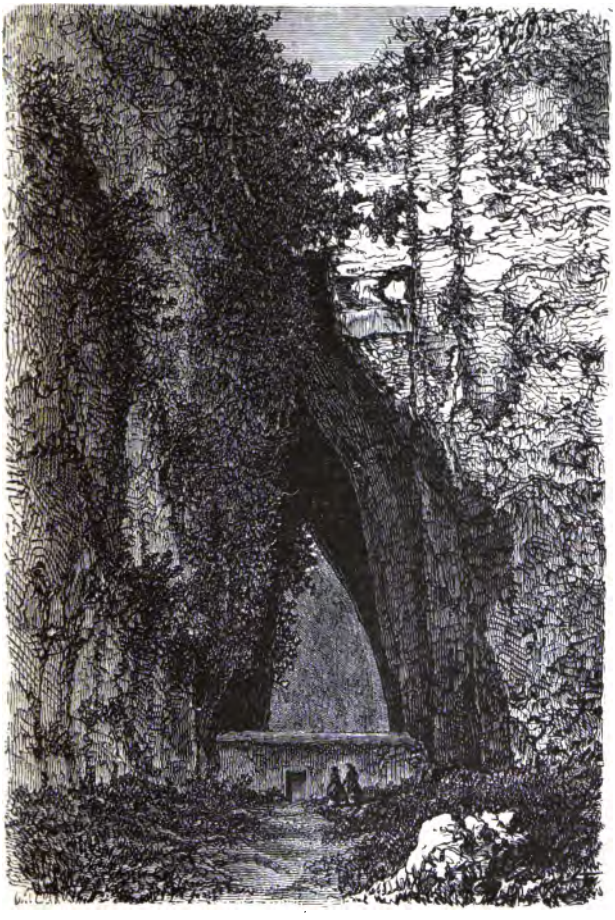


Fig. 27. Oreille de Denys.

lées sont deux membranes en baudruche qui, sans renforcer le son, le rendent moins confus. Un autre système est représenté par le numéro 5; pour le réaliser, Itard conseille de prendre une coquille de vis, de fuseau ou de strombe, et d'y ajouter un pavillon et un petit tube pour l'oreille; on peut encore, si l'on veut, introduire dans le pavillon une ou deux membranes en

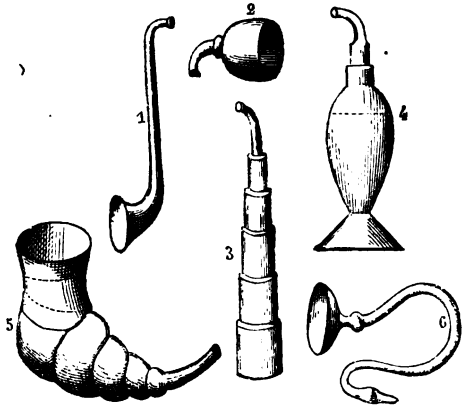


Fig. 28. — Cornets acoustiques.

baudruche, comme l'indiquent dans la figure les lignes ponctuées.

M. Kœnig a construit un cornet acoustique qui est en même temps un stéthoscope (n° 6). Une capsule fermée par une membrane communique avec l'oreille au moyen d'un tube de caoutchouc, terminé par un bout en ivoire. Lorsqu'on parle devant la membrane, celle-ci s'agite et pousse la colonne d'air qui est dans le tube contre le tympan de l'oreille. S'il s'agit d'employer cet appareil comme stéthoscope, on remplace la mem-

brane simple par une lentille formée de deux membranes que l'on gonfle par insufflation au moyen d'un robinet latéral. La membrane antérieure s'applique sur la poitrine du malade, elle se moule sur la peau et en transmet fidèlement les frémissements à l'air emprisonné dans la lentille, qui les transmet jusqu'à l'oreille du médecin. Avec cet appareil, on peut s'ausculter soi-même en pressant la capsule contre la poitrine et en introduisant le bout du tube de caoutchouc dans l'oreille. La même capsule peut recevoir jusqu'à cinq tubes, de sorte que, dans une clinique, plusieurs élèves peuvent ausculter simultanément le même malade. La longueur des tubes peut aller à 4 mètres et plus sans que le son paraisse affaibli. Avec ce stéthoscope, un médecin pourrait donc, sans sortir de son cabinet, entendre les battements du cœur d'un malade qui se trouverait à plusieurs étages au-dessus.

V

VITESSE DU SON

Mersenne. — Le Bureau des longitudes. — Le capitaine Parry. — M. Regnault. — Beudant. — Colladon et Sturm. — Biot. — Wertheim. — Distances mesurées par le son; M. d'Abbadie. — Distance d'un orage. — Profondeur d'un lac par l'écho du fond.

Le son ne se propage point instantanément; c'est ce qu'ont remarqué les premiers observateurs qui se sont occupés des phénomènes sonores. Le bruit du tonnerre ne s'entend ordinairement que longtemps après l'éclair, et l'intervalle est d'autant plus grand que le nuage orageux est plus éloigné. Mais quel est le temps exact que le son met à franchir une distance donnée? en d'autres termes, quelle est sa vitesse de propagation? Cette question a déjà préoccupé Mersenne et Kircher. « La lumière, dit Mersenne, s'étend dans toute la sphère de son activité dans un instant, ou si elle a besoin de quelque temps, il est si court que nous ne pouvons le remarquer; mais le son ne peut remplir la sphère de son activité que dans un espace de temps qui est d'autant plus long que le lieu où se fait le son est plus éloigné de l'oreille, comme l'on expérimente en plusieurs manières, et

particulièrement lorsque l'on voit que la hache ou le maillet du bûcheron [1] et des autres qui frappent sur quelque corps, a déjà frappé deux coups lorsque l'on oyt le premier coup ; ce qui arrive quand on est éloigné de cinq on six cents pas, ou davantage. Or il faudrait faire plusieurs expériences pour savoir si la tardiveté du son suit la grandeur des espaces... » Le P. Mersenne décrit alors les expériences par lesquelles on pourrait connaître la vitesse du son; elles consistent à compter les battements du pouls depuis le moment où l'on aperçoit le feu d'un mousquet ou d'une pièce d'artillerie jusqu'à celui où l'on entend la détonation. Il rapporte les observations de ce genre qui ont été faites au siège de la Rochelle, par l'un des capitaines; mais les résultats sont très discordants, et Mersenne en conclut que la vitesse de propagation du son varie beaucoup suivant les circonstances atmosphériques ou locales. Toutefois, il croit pouvoir admettre que le son va moins vite que la balle d'une arquebuse : en effet, dit-il, « on voit les oiseaux qui tombent morts de dessus les branches des arbres avant qu'on oye le bruit ou le son du coup, quoique l'oreille soit proche de ladite arquebuse. » En 1673, Kircher déclare que rien de certain n'est encore connu sur la vitesse du son, mais que l'Académie florentine s'occupe d'instituer des expériences destinées à éclaircir ce sujet délicat. Ces expériences paraissent avoir eu lieu dès 1660. On avait observé le temps qui s'écoulait entre l'éclair d'un coup de canon et l'arrivée du bruit. La vitesse trouvée était de 350 à 360 mètres par seconde.

Un moyen direct d'acquérir une notion approchée de la vitesse du son est fourni par l'écho. Le P. Mersenne

1. Lucrèce fait la même remarque.

avait constaté, à l'aide d'un pendule qui battait la seconde, que l'on peut prononcer sept syllabes dans cet espace de temps. Or un écho éloigné de 81 toises répond sept syllabes; il faut une seconde pour les prononcer, et on les entend qui reviennent pendant la seconde suivante. Le son parcourt donc 81 toises en allant et autant en retournant, c'est-à-dire 162 toises en tout dans l'espace d'une seconde; « de manière, dit Mersenne, qu'ont peut choisir ce nombre de toises pour la vitesse des sons réfléchis, laquelle j'ai toujours trouvée égale, soit que l'on use du bruit des trompettes et des arquebuses, ou de celui des pierres, et de la voix grave ou aiguë... » Ces expériences, d'après lesquelles la vitesse du son serait d'environ 316 mètres par seconde (nous verrons tout à l'heure que ce nombre est déjà très approché de la vérité), furent plus tard discutées par le P. Kircher, qui élève une foule d'objections contre la prétendue constance de la vitesse du son. Il dit, par exemple, qu'un son très fort doit se réfléchir plus vite, comme une balle poussée contre un mur revient d'autant plus vite que le choc est plus violent. La comparaison est très fausse, car le son n'est pas répercuté comme une balle, puisque la masse d'air dans laquelle se propage le son ne change pas de place; l'air reste immobile, il ne se précipite pas vers l'obstacle et n'en revient pas vers l'oreille. On ne peut donc pas juger du mouvement sonore d'après l'analogie du mouvement d'une balle élastique. Kircher prétend aussi que l'écho voyage plus vite pendant le silence de la nuit qu'à travers les mille bruits confus du jour, et que les vents exercent une grande influence sur la propagation du son.

Les premières expériences exactes sur la vitesse du son

dans l'air furent instituées en 1738 par une commission de l'Académie des sciences, composée de Lacaille, Maraldi et Cassini de Thury, qui s'adjoignirent plusieurs aides. Ils avaient choisi pour stations l'Observatoire de Paris, la pyramide de Montmartre, le moulin de Fontenay-aux-Roses et le château de Lay, à Montlhéry. Des pièces de canon placées sur les hauteurs de Montlhéry et de Montmartre, dont la distance est de 29 kilomètres, tiraient alternativement, et les observateurs installés aux quatre stations mesuraient, à l'aide d'un pendule à secondes, le temps qui s'écoulait entre l'arrivée du bruit et l'arrivée de la lumière. On trouva que le son mettait en moyenne 1 minute 25 secondes à franchir la distance de 29 kilomètres, ce qui donne 337 mètres par seconde à la température d'environ 6°. On reconnut aussi que le son était retardé par un vent contraire, et accéléré lorsqu'il marchait avec le vent.

Ces expériences furent répétées, avec quelques modifications, par Kaestner, Benzenberg, Goldingham et d'autres physiciens, mais leurs résultats n'inspirèrent qu'une médiocre confiance. Une nouvelle mesure fut donc entreprise en 1822, à la demande de Laplace, par les membres du Bureau des longitudes. On fit porter deux pièces de canon, l'une sur la butte de Montlhéry, l'autre sur celle de Villejuif; la distance est de 18,613 mètres. A Villejuif se trouvaient de Prony, Arago, Matthieu; à Montlhéry Alexandre de Humboldt, Gay Lussac et Bouvard. Chaque observateur était muni d'un chronomètre à arrêt qui marquait au moins les dixièmes de seconde. Les coups de canon tirés de Montlhéry furent tous entendus à Villejuif, mais les coups inverses étaient tellement affaiblis, qu'on n'en entendit qu'un petit nombre; cette circon-

stance singulière, que nous avons mentionnée au chapitre précédent, ne permit pas de tenir compte de l'influence du vent aussi exactement qu'on l'aurait voulu. On trouva la vitesse du son égale à 331 mètres à la température de zéro.

Depuis ces mémorables expériences, on en a fait de nouvelles en Allemagne, en Hollande, dans l'Amérique du Nord, etc. Pendant le voyage de Franklin aux régions polaires en 1825, le lieutenant Kendall fit tirer quarante coups de canon sur les bords du grand lac des Ours, à des températures comprises entre 2° et 40° au-dessous de zéro. Le capitaine Parry fit également quelques observations sur la propagation du son à des températures très basses : au Winter-Island il eut 41°, au port Bowen 38° au-dessous de zéro.

Les résultats de toutes ces mesures montrent que la vitesse du son dans un air calme ne doit pas beaucoup s'éloigner de 331 ou 332 mètres par seconde ; pour chaque degré de chaleur il faut ajouter environ 0,^{m}60, de sorte qu'à la température de 15° cette vitesse devient égale à 340 mètres.

Biot a imaginé une expérience ingénieuse pour s'assurer si les sons de hauteur différente se propagent également vite. Si les notes n'avaient pas toutes la même vitesse, il est clair qu'un air musical, entendu de fort loin, ne se ressemblerait plus ; la mesure serait troublée parce que certaines notes seraient entendues trop tôt ou trop tard. Dans les circonstances ordinaires on ne s'apercevrait pas d'une petite inégalité dans la propagation des notes, quand même elle existerait, parce que la distance où le son des instruments de musique s'entend encore distinctement n'est pas suffisante pour faire apprécier une pareille inégalité. Voici

comment s'y prit Biot pour augmenter la distance. Il fit jouer un air de flûte à l'une des extrémités de l'aqueduc d'Arcueil, composé de tuyaux d'une longueur totale de 951 mètres, d'où l'eau avait été retirée. Se plaçant lui-même à l'autre bout, il écoutait. La mélodie arriva nette et parfaitement rythmée ; les notes se propageaient donc avec une vitesse uniforme.

De 1862 à 1866, M. Regnault a repris ces déterminations avec toutes les ressources de la physique moderne. Environ 400 coups de canon ont été tirés dans la plaine de Satory. L'arrivée du bruit était constatée par des membranes tendues qui, en repoussant un petit pendule, interrompaient un circuit électrique. L'instant du coup de feu et l'arrivée du son sur la membrane étaient enregistrés par un télégraphe Morse sur une bande de papier recouverte de noir de fumée. Sur la même bande, une pendule électrique marquait la seconde à côté d'une pointe fixée à un diapason vibrant, qui traçait les centièmes de seconde. Ces expériences furent répétées sur plusieurs conduites à gaz, et en dernier lieu dans le nouvel égout construit sous le boulevard Saint-Michel, sur une série de larges tubes de fonte qui formaient une longueur de plus d'un kilomètre et demi. On observait les retours successifs du bruit d'un pistolet ou d'une trompette, en fermant une trappe aussitôt que le son avait été lancé dans le tube ; il allait et revenait alors jusqu'à dix fois, ébranlant les membranes disposées le long de sa route. M. Regnault a étudié également la transmission d'un simple choc communiqué à la colonne d'air, sans effet sonore. J'ai assisté à quelques-unes de ces expériences, qui ont donné lieu à des résultats curieux.

M. Regnault a d'abord constaté que la *vitesse du*

son diminue à mesure que la distance augmente. Dans l'air calme, sec et à zéro, il l'a trouvée égale à 331^{m},37, la distance étant de 1,280 mètres, et à

Fig. 29. — Expériences du Bureau des longitudes.

330^{m},7 seulement quand la distance était de 2,445 mètres. Les expériences faites avec les tuyaux ont donné un résultat analogue. Il a été constaté ensuite que la vitesse du son *augmentait avec son intensité*, c'est-à-dire avec la charge de poudre qui le

produisait[1]. Dans les conduites, la portée et la vitesse moyenne du son augmentaient encore, à charge égale, avec le calibre des tuyaux.

M. Regnault distingue la *portée sonore* de la portée *silencieuse*, qui correspond aux derniers mouvements des membranes. Voici les portées observées dans la conduite à gaz d'Ivry (calibre $0^m,11$), dans une conduite de la route Militaire ($0^m,30$) et dans celle de l'égout Saint-Michel ($1^m,10$), avec une charge de 1 gramme. Ces portées ont été estimées d'après le nombre des retours de son réfléchi.

CALIBRE	LONGUEUR	PORTÉE SONORE	PORTÉE SILENCIEUSE
$0^m,11$	567^m	$1,150^m$	$4,050^m$
$0^m,30$	1,905	3,810	11,430
$1^m,10$	1,590	9,540	19,850

Dans une autre conduite de $1^m,10$, qui forme le grand siphon de Villemonble, on a constaté dix retours avec une charge de $2^{gr},40$, ce qui donne une portée silencieuse de près de 100 kilomètres. La vitesse du son diminuait d'un retour à l'autre; ainsi dans la conduite de l'égout, elle descendait de 334 à 330 mètres; dans la conduite d'Ivry, de 331 à 326 mètres. La nature de la paroi exerce aussi son influence; on a remarqué que le son porte plus loin dans les galeries à parois lisses que dans celles où les murs sont formés de meulière brute.

Dans l'une des dernières expériences, il a été constaté que les sons graves vont plus vite que les sons aigus; M. Kœnig a entendu le son fondamental d'une trom-

1. Ce résultat est d'accord avec une assertion de James Ross, qui croyait se rappeler que dans les expériences de Parry, où la distance était de 4 kilomètres, les coups de canon étaient entendus avant la voix qui commandait le feu.

pette revenir avant les harmoniques, lesquels se succédaient par ordre d'acuïté.

M. Regnault a enfin mesuré la vitesse du son dans des gaz autres que l'air. Il l'a trouvée égale à 3,8 dans l'hydrogène, à 1,2 dans l'ammoniaque, à 0,8 dans l'acide carbonique et le protoxyde d'azote, en prenant pour unité la vitesse observée dans l'air.

N'oublions pas de mentionner ici les expériences de M. Le Roux, qui a mesuré, avec une remarquable précision, la vitesse du son dans l'air, en se servant d'un tuyau de zinc, entouré de glace.

On s'est encore occupé de mesurer la vitesse avec laquelle le son se propage dans les liquides. Beudant y a songé le premier. Il fit amarrer deux bateaux dans le port de Marseille en deux points dont la distance était connue. Dans le premier était un aide chargé de frapper une cloche immergée à côté du bateau ; à chaque coup, il donnait un signal qu'on pouvait apercevoir de l'autre bateau. L'observateur installé dans celui-ci marquait le moment où il voyait le signal, et celui où un autre aide, qui plongeait, lui annonçait l'arrivée du son dans l'eau. La différence de ces moments devait être le temps employé par le son pour franchir la distance des deux bateaux. Beudant trouva de cette manière que la vitesse du son dans l'eau de mer était d'environ 1,500 mètres par seconde; mais il attacha si peu d'importance à ce résultat, vu l'imperfection des moyens employés, qu'il ne jugea pas à propos de le publier. Ses expériences sont rapportées par Colladon et Sturm.

Ces deux physiciens ont mesuré en 1826 la vitesse du son dans l'eau du lac de Genève. La profondeur considérable du lac (elle est en moyenne de 140 mètres), et la limpidité de son eau, qui ne contient que très

peu de substances étrangères, le recommandaient d'une manière toute spéciale pour des expériences de ce genre. La plus grande distance que l'on put se procurer en eau profonde fut trouvée entre Rolle et Thonon : elle est de 13^{kil},500. Près de Rolle, on amarra une barque portant une cloche du poids de 65 kilogrammes, qui plongeait dans l'eau. Tout était réglé de telle sorte qu'au moment où un marteau touchait la cloche, une mèche enflammée tombait sur un tas de poudre disposé sur le pont. Une autre barque était amarrée du côté de Thonon.

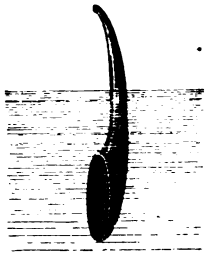


Fig. 30.

Les observateurs qui s'y trouvaient épiaient l'arrivée du son dans l'eau avec un cornet acoustique d'une construction spéciale, représenté fig. 30. Il se composait d'un long tube en forme de cône évasé et recourbé, dont l'orifice était fermé par une membrane. L'observateur tournait la surface de cette membrane du côté d'où le son devait arriver, et collait l'oreille à l'extrémité supérieure du cône, en regardant attentivement du côté de la barque qui portait la cloche. Au moment où il apercevait l'éclair, il lâchait la détente d'un compteur à pointage, sorte de montre dont l'aiguille peut être arrêtée ou remise en liberté par une simple pression sur un bouton. On l'arrêtait au moment où le son de la cloche était perçu ; ce fut toujours environ 9 secondes après l'éclair. En divisant la distance des deux bateaux par l'intervalle observé, on obtenait la vitesse du son dans l'eau ; elle fut trouvée égale à 1,435 mètres; c'est plus de quatre fois la vitesse que le son a dans l'air.

Ces expériences ont permis de faire plusieurs remarques intéressantes sur la manière dont le son se propage dans l'eau.

Loin d'être vibrant et prolongé comme lorsqu'il est transmis par l'atmosphère, le son de la cloche était sec, comme le choc de deux lames de couteau. L'eau, qui est très peu compressible, le dépouillait complètement de son timbre accoutumé. Le dernier jour, le lac était très agité; on avait toutes les peines du monde à tenir les barques en place, mais le mouvement de l'eau se montra sans influence sur le résultat des observations.

Wertheim a, plus tard, déterminé la vitesse du son dans plusieurs liquides par une méthode indirecte, en les faisant vibrer et résonner comme des gaz. Dans l'éther et dans l'alcool absolu, cette vitesse a été trouvée égale à 1,160 mètres; dans une dissolution de chlorure de calcium elle était de 1,980 mètres; ce sont les deux extrêmes.

Dans les corps solides, le son marche beaucoup plus vite que dans les gaz ou dans les liquides. Les premiers expérimentateurs qui ont voulu en mesurer la vitesse dans des lattes de bois, dans une corde, etc., l'ont trouvée trop grande pour être appréciée. Hassenfratz essaya en vain de la déterminer dans les parois des carrières de Paris. Les premières mesures un peu sérieuses sont dues à Biot et Martin, qui se servaient des tuyaux de fonte destinés à porter les eaux de la Seine de la machine de Marly à l'aqueduc de Luciennes. Le son d'un petit timbre suspendu à une extrémité du conduit arrivait à l'autre extrémité de deux manières : d'abord par la fonte, puis, 2s,50 plus tard, à travers la colonne d'air intérieure. La longueur totale des tuyaux était de

951 mètres. Dans l'air, le son franchit cette longueur en $2^s,85$; en retranchant de ce nombre l'avance de $2^s,50$ qu'il avait sur le son transmis par la fonte, on trouve que ce dernier employait $0^s,35$ à parcourir les tuyaux. Il en résulte une vitesse d'environ 2,700 mètres.

Cette détermination n'est pas exacte; le nombre trouvé est trop faible. Cela s'explique par la résistance que les rondelles de plomb intercalées entre les tuyaux devaient opposer à la transmission du son. Plus tard, MM. Breguet et Wertheim ont mesuré la vitesse de propagation du son dans les fils télégraphiques du chemin de fer de Versailles (rive droite). L'un d'eux frappait, à un moment donné, un coup de marteau sur un poteau tendeur ; l'autre notait l'instant où il entendait le son. Ces observations ont donné 3,485 mètres pour la vitesse du son dans le fil de fer.

Par la méthode des vibrations, qui est une méthode indirecte, Wertheim a trouvé la vitesse du son dans quelques autres métaux. Dans le plomb, elle est égale à quatre fois celle qui a lieu dans l'air, ou à environ 1,300 mètres ; dans l'argent et dans le platine, elle est d'environ 2,700 mètres ; dans le zinc et le cuivre, elle atteint 3,700 mètres ; dans le fer et l'acier, elle devient égale à 5,000 mètres, et dans le verre à glaces elle est de 5,200 mètres. La plus grande vitesse du son est celle que Chladni a constatée dans le bois de sapin, par une méthode analogue ; 18 fois la vitesse qui s'observe dans l'air, ou près de 6,000, mètres.

Pour comparer ces divers résultats, imaginons que le tunnel en maçonnerie que M. Thomé de Gamond a proposé de construire sous la Manche ait été réalisé. La distance du cap Grisnez à la pointe Eastware, stations projetées de la voie sous-marine, est d'environ 33 kilo-

mètres. Un coup de canon tiré au cap Grisnez sera donc entendu à la station anglaise au bout d'environ 97 secondes, à travers l'atmosphère ou par la colonne d'air enfermée dans le tunnel. L'eau de mer transmettrait la secousse en 23 secondes. Par les rails de la voie ferrée, elle arriverait en 6s,50, par les fils du télégraphe probablement un peu moins vite. Enfin, s'il y avait une latte de sapin assez longue pour joindre les deux rives opposées, elle transmettait le son en 5s,50, le temps de prononcer rapidement trois alexandrins.

La vitesse du son dans l'air étant connue, on peut s'en servir pour mesurer approximativement une distance ; on observe l'intervalle qui s'écoule entre l'éclair d'un coup de feu et l'arrivée du bruit ; chaque seconde de retard représente 340 mètres. On estime ainsi l'éloignement d'un orage en comptant les battements de pouls entre l'éclair et le tonnerre; 4 ou 5 battements correspondent à 1 kilomètre. L'idée de mesurer ainsi des distances terrestres se rencontre déjà chez Mersenne. M. d'Abbadie en a tiré partie en Éthiopie ; il y a mesuré plusieurs bases par le moyen du son. Ainsi, dans l'île de Moçawa, pendant le ramadan ou mois de demi-jeûne des musulmans, on tire tous les soirs, au coucher du soleil, un coup de canon qui annonce la rupture du jeûne. M. Antoine d'Abbadie en profita pour observer le temps qui s'écoulait entre l'éclair et l'arrivée du son au rivage opposé. Il prit station sur une colline près du village d'Omkullu, sur la terre ferme, et y attendit le coup de canon du fort Mudir. Le son lui arriva 18 secondes après la perception de l'éclair, par une température de 35°; la distance était donc de 6440 mètres. Une autre fois. M. d'Abbadie mesura, par le même procédé, la distance de la ville d'Adoua au

mont Saloda. Son frère Arnauld s'installa sur la montagne avec un fusil à mèche ; lui-même était sur le toit d'une maison de la ville, armé d'une espingole. On tirait alternativement, et chacun notait les secondes à la montre. La distance fut trouvée égale à 3 kilomètres ; mais l'on avait fait apparemment trop de bruit, car les deux frères furent exilés du Tigré.

Newton a donné une formule qui sert à calculer la profondeur d'un puits par le temps qui s'écoule entre le moment où une pierre quitte la margelle et celui où l'on entend le bruit qu'elle produit en frappant l'eau. 10 secondes donneraient une profondeur d'environ 380 mètres, et 5 secondes 107 mètres.

On pourrait aussi, afin de connaître la profondeur d'un lac ou celle de la mer, observer la réflexion d'un son assez fort pour revenir du fond. Arago avait proposé cette expérience à Colladon dès 1826, mais elle ne fut tentée qu'en 1838 par Ch. Bonny-Castle, sur les côtes de la Virginie, et à la demande de l'amirauté des États-Unis. Le professeur américain trouva que le son était mieux perçu dans l'air que dans l'eau, et que la plus grande distance à laquelle il pouvait encore entendre une cloche sous l'eau était de 3 kilomètres. Ces conclusions furent vivement combattues par Colladon, qui reprit aussitôt ses expériences sur le lac de Genève. En 1826, il avait parfaitement entendu une cloche de 65 kilogrammes à 13 kilomètres ; en 1841, une cloche de 500 kilogrammes, prêtée par une des églises du canton de Genève, fut très bien entendue sur une distance de 35 kilomètres (entre Promenthoux et Grand-Veau, près Cully) ; elle était suspendue à 15 mètres sous l'eau, et le marteau qui la frappait pesait 10 kilogrammes. Colladon en conclut que, dans

des circonstances favorables, le son se propagerait sous l'eau jusqu'à une distance de quelque cent mille mètres. Les palettes d'un bateau à vapeur ne produisent qu'une sorte de bourdonnement qui cesse d'être entendu sous l'eau à 1000 mètres. Mais le bruit d'une chaîne, agitée à une certaine profondeur, se distingue si bien que l'on reconnaît lorsqu'une barque éloignée de 3 ou 4 kilomètres lève son ancre. Il est bien entendu qu'il faut toujours, dans ces expériences, se servir du cornet hydro-acoustique. Pendant celles qui étaient faites avec la grosse cloche, chaque coup frappé put être compté dans une maison bâtie sur un remblai, à une distance de 3 kilomètres, quoique cette maison fût séparée de la cloche par un promontoire ; le son paraissait sortir des fondations et des piliers des murailles. Colladon ne se prononce pas sur la possibilité de mesurer la profondeur de l'eau par un écho du fond.

VI

RÉFLEXION DU SON

Lois de la réflexion. — Écho. — Écho polysyllabique. — Écho polyphone. — Écho hétérophone. — Réflexion et résonance. — Échos célèbres. — Légendes — Réfraction du son.

La réflexion constitue une étroite analogie entre le son et la lumière. Comme les rayons lumineux, les sons se réfléchissent sur les obstacles qu'ils rencontrent, et de même que la surface unie d'un miroir renvoie plus de lumière qu'une surface dépolie, les différents corps ne sont pas tous également propres à répercuter les ondes sonores. Les corps durs et résistants les réfléchissent beaucoup mieux que les corps mous et flexibles, qui ne se redressent pas sous le choc qu'ils reçoivent.

Les lois de la réflexion du son ne paraissent point être aussi simples que celles qui régissent les mouvements des rayons lumineux, car les ondes sonores peuvent se propager suivant des lignes courbes ; dans un certain sens, elles tournent les obstacles. Néanmoins il sera permis, pour simplifier les explications, de parler de *rayons sonores*, comme on parle de rayons lumineux ;

ce seront des lignes droite par lesquelles nous pourrons représenter la marche d'un son depuis la source sonore jusqu'à l'oreille. Dès lors, nous dirons, pour le son comme pour la lumière, que *le rayon incident et le rayon réfléchi font avec la surface réfléchissante des angles égaux* et qu'ils sont compris dans un même plan perpendiculaire à cette surface. La même loi s'observe aussi dans le choc des corps élastiques. Les personnes qui connaissent le jeu de billard savent que la

Fig. 31. — Réflexion du son.

bille que l'on chasse contre la bande est repoussée dans une direction symétrique avec celle qui lui avait été imprimée par le joueur. C'est ainsi que la voix qui rencontre un mur M dans une direction AM (fig. 31), est renvoyée dans une direction MB symétrique à la première par rapport à la surface du mur, ou, ce qui revient au même, par rapport à la normale MN. L'angle que cette normale fait avec AM se nomme l'*angle d'incidence;* celui qu'elle fait avec MB est l'*angle de réflexion*. Ces deux angles sont égaux ; de plus, le

rayon réfléchi MB est dans le plan qui renferme AM et la normale MN.

Quand le point A d'où émane le son se rapproche de la ligne MN, le point B, vers lequel le son est réfléchi, s'en rapproche aussi, et ces deux points coïncident lorsque le son marche dans la direction de la normale même. La voix qui part de N et qui rencontre le mur, dans la direction perpendiculaire NM, revient par le même chemin, de M en N, vers son origine.

Ces principes nous aideront à comprendre comment se produit le phénomène des *échos*. On appelle ainsi la répétition d'un son réfléchi par un obstacle éloigné. Supposons d'abord qu'il n'y ait qu'une seule surface réfléchissante. Si l'observateur veut entendre l'écho de sa propre voix, il faut qu'il se place sur la normale MN qui est perpendiculaire à la surface réfléchissante ; s'il veut entendre l'écho d'un bruit produit en un point A, il faut qu'il se place en un point B, symétrique par rapport à la normale MN. Avant d'entendre le son réfléchi qui parcourt la ligne brisée AMB, il entendra nécessairement le son qui arrive directement de A en B, puisque ce dernier fait moins de chemin que le son réfléchi. Nous supposons, bien entendu, qu'il n'existe entre A et B aucun obstacle qui empêche la transmission directe du son.

L'observateur entendra donc, en général, deux sons successifs qu'il pourra distinguer l'un de l'autre, si le premier a cessé de se faire entendre au moment où arrive le second. Cette condition, qui doit être remplie pour que l'écho soit distinct, dépend évidemment de la distance de l'obstacle qui réfléchit le son.

Considérons d'abord le cas où le son revient au point même d'où il est parti. L'observateur est alors en N ; il

entend sa propre voix d'abord au moment même où il l'émet, puis de nouveau après que le son a parcouru deux fois la distance MN. Or il faut au moins 1 dixième de seconde pour prononcer une syllabe, et encore faudrait-il parler très vite; en moyenne, on ne prononce pas plus de cinq syllabes en une seconde. Si donc l'obstacle est trop rapproché de l'observateur, la première syllabe reviendra avant qu'il ait pu prononcer la dernière, il y aura confusion, l'écho ne répétera que les dernières syllabes ou même ne se produira pas du tout.

Nous avons vu que le son fait en moyenne 340 mètres par seconde; en 1 dixième de seconde, il fera donc 34 mètres, et 68 dans 1 cinquième de seconde. Un obstacle, éloigné de 34 mètres en ligne droite, nous renverra donc le son après 1 cinquième de seconde, car le son mettra 1 dixième de seconde pour aller et 1 dixième pour revenir. Cette distance suffira pour obtenir un écho *monosyllabique*, c'est-à-dire la répétition d'une seule syllabe. Pour la prononcer, il fallait 1 cinquième de seconde; au moment où je prononce la fin de ma syllabe, le commencement a déjà eu le temps de revenir, puisque le son met 1 cinquième de seconde à franchir deux fois la distance de 34 mètres; le reste revient ensuite dans l'ordre où il a été prononcé, et au bout d'un nouveau cinquième de seconde, le retour de la syllabe est accompli. Si l'obstacle est plus près que 34 mètres, le son réfléchi empiète déjà sur le son articulé, ils se mêlent et se confondent; si l'obstacle est à une distance plus grande, il s'écoulera un temps plus ou moins long entre la fin de la syllabe articulée et l'écho qui la répète.

Ce que nous avons dit de l'écho monosyllabique

s'applique immédiatement aux échos *polysyllabiques*, ou de plusieurs syllabes ; nous n'aurons qu'à multiplier la distance en proportion du nombre de syllabes qui doivent être répétées. Pour deux syllabes, il faudra 68 mètres, pour trois, 102 mètres, etc. On comprend d'ailleurs que ces distances pourront être prises plus petites, lorsqu'on prononce plus de cinq syllabes par seconde, et qu'il faudra les prendre plus grandes pour quelqu'un qui prononce moins de cinq syllabes par seconde[1]. Le principe est toujours le même ; il faut que la distance soit suffisante pour permettre au son d'aller et de revenir pendant le temps employé à prononcer la phrase que l'écho doit répéter. Cependant, on peut admettre que lorsqu'on prononce plusieurs syllabes de suite, l'émission est un peu plus précipitée que lorsqu'on ne profère qu'une seule syllabe ; c'est ce qui explique pourquoi Kircher a trouvé des distances décroissantes pour les échos polysyllabiques. Tandis qu'il donne 100 pieds pour une syllabe isolée, il n'a trouvé que 190 pieds au lieu de 200 pour deux syllabes, et que 600 au lieu de 700 pour les sept syllabes :

Arma virumque cano...

Il constate d'ailleurs que ces distances comportent une grande latitude ; ainsi, l'écho d'un son de trompette est distinct entre 90 et 110 pieds ; la distance

1. Les auteurs qui ont écrit sur la matière ne sont pas d'accord quant à la distance nécessaire pour la production d'un écho. Mersenne demande 69 pieds (22^m) pour un écho simple ; John Morton 90 pieds anglais (27^m) pour une syllabe, 105 pieds pour deux syllabes, 160 pieds pour trois syllabes, etc. A la rigueur, une distance d'une vingtaine de mètres suffirait pour un écho simple. On manque, à cet égard, de données précises.

d'un écho de sept syllabes peut être réduite jusqu'à 400 pieds ; d'autres fois, 600 pieds ne suffisent pas pour entendre la répétition de sept syllabes. Quand on prononce plus de syllabes que l'écho n'en peut répéter distinctement, les premières qui reviennent sont couvertes par les dernières émises, et l'on n'entend qu'une répétition tronquée de la phrase qui a été prononcée. On peut se servir de cette circonstance pour établir avec l'écho une conversation par demandes et réponses ; il suffit que la fin de la phrase interrogative constitue une réplique.

Nous avons toujours supposé jusqu'ici que l'observateur entend l'écho d'un son qu'il produit lui-même, et qui revient par la réflexion à son point de départ. Le même raisonnement s'applique encore au cas où le son prend sa source à une certaine distance de l'observateur, comme lorsque ce dernier se place en B (fig. 31) et que le son vient du point A. On n'aura qu'à considérer la différence du chemin direct AB et du chemin indirect AMB ; cette différence représente le détour que fait le son réfléchi, ou bien l'avance du son transmis directement ; il faut qu'elle soit égale à deux fois 34 ou à 68 mètres pour un écho monosyllabique, au double pour un écho de deux syllabes, et ainsi de suite.

Il nous reste à parler des échos *multiples* ou *polyphones*. Ce sont les échos qui reproduisent plusieurs fois de suite le même son ou la même phrase. Ils se forment quand il y a plusieurs obstacles, placés à des distances différentes et qui agissent soit isolément, soit ensemble, en se renvoyant le son par des réflexions successives. La figure suivante, empruntée à Kircher, représente un écho heptaphone ou à sept voix. Les

pans de mur qui réfléchissent la voix sont à peu près également espacés; elle revient d'abord du premier, qui est le moins éloigné, puis du second, puis des autres qui suivent. Si l'écho doit répéter sept fois une syllabe isolée, il faut que les distances successives diffèrent toujours d'au moins 34 mètres, pour deux syllabes; les intervalles doivent être de 68 mètres, et ainsi de suite. A mesure que l'écho revient de plus loin, il devient plus faible, parce que le son s'éparpille

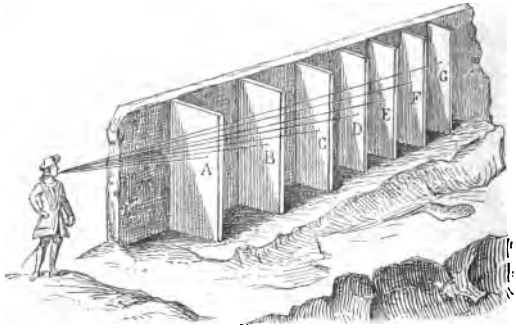


Fig. 32. Écho heptaphone.

en route; la voix expire peu à peu et finit par s'éteindre.

Quand les obstacles qui produisent les échos successifs, au lieu d'être également espacés, se rapprochent et se resserrent à mesure qu'ils sont placés plus loin de l'observateur, les échos se confondent en partie, le deuxième arrivant avant la fin du premier, le troisième avant la fin du deuxième, etc. Kircher montre le parti qu'on peut tirer de cette circonstance pour obtenir une phrase avec un mot. Supposons un écho à

cinq voix (fig. 33) disposé de telle sorte que le premier obstacle répète distinctement le mot *Clamore*. Si le deuxième obstacle était à une distance double, le troisième à une distance triple, et ainsi de suite, on aurait un écho trisyllabique et pentaphone. Mais rapprochons le deuxième obstacle jusqu'à ce que le son des consonnes *cl* se confonde avec la fin du premier écho *Clamore*, nous n'entendrons la seconde fois que le mot *Amore*.

Fig. 33. Écho à variations.

En rapprochant convenablement les obstacles suivants, nous réduirons le troisième écho à *More*, le quatrième à *Ore*, le dernier à *Re*. Dès lors, si quelqu'un demande à haute voix [1] :

Tibi vero gratias agam quo clamore?

l'écho répond :

Clamore. — Amore. — More. — Ore. — Re [2].

1. Par quels accents dois-je te remercier ?
2. Par la voix, l'amour, la conduite, les lèvres et l'action.

Kircher se pose encore le problème de construire un écho *hétérophone*, un écho qui réponde autre chose que ce qu'on lui chante. Voici comment il se tire d'affaire. Devant l'angle saillant que forment deux murs (fig. 34) on dispose un obstacle de telle sorte qu'au lieu de renvoyer la voix au point d'où elle est partie, il la jette de l'autre côté du bâtiment, où se trouve caché un compère; celui-ci entend la demande et s'empresse de répondre ce qu'il lui plaît; sa voix prend le chemin qu'a suivi la demande, et la réponse arrive ainsi à l'auditeur mystifié. Dans la figure, on demande : *Quod tibi nomen?* (comment vous appelez-vous?) et l'écho fallacieux répond : *Constantinus*. Kircher raconte qu'avec cette innocente mystification, il s'est beaucoup amusé aux dépens de ses amis, dans la campagne de Rome. Pour que l'illusion soit complète, il faut que les deux compères aient à peu près la même voix.

Il serait possible d'utiliser les échos d'une église comme ornements du chant, en disposant habilement des pauses qui seraient remplies par les résonances. Kircher donne plusieurs exemples de phrases musicales ainsi composées; il ajoute que les églises de Saint-Pierre et de Saint-Jacques des Incurables à Rome offrent des dispositions très favorables pour mettre en œuvre cet artifice.

En hébreu l'écho s'appelle *Bat kol*, fille de la voix. Pour les anciens poètes, c'est une nymphe qui aima le beau Narcisse; dédaignée, elle se fondit en larmes, et il n'en resta que la voix qui obéit à la passion d'un autre...

Nec prior ipsa loqui didicit resonabilis Echo.

Les échos qui animent un paysage établissent en

quelque sorte un lien de sympathie entre l'homme et la nature, qui semble répondre à ses appels. La forêt n'est

Fig. 34. Écho hétérophone.

pas insensible à nos joies : elle répète les cris des chasseurs et les fanfares du cor.

Non canimus surdis, respondent omnia silvæ.

VIRGILE.

Voilà, dit le P. Mersenne, comme le Créateur a donné un langage aux bois, aux rivières et aux montagnes.

Les échos que l'on rencontre dans les villes et dans

toutes les contrées un peu accidentées offrent des qualités très variées. Tantôt la voix qui répond à l'appel est sourde et comme enrouée, tantôt elle est claire, vibrante et parfaitement accentuée. Ces différences, qui dépendent évidemment de la nature des surfaces réfléchissantes, nous obligent à admettre qu'il y a dans l'écho encore autre chose qu'une simple réflexion. Il est hors de doute que les phénomènes de résonance, dont nous nous occuperons plus loin, y jouent aussi un certain rôle. Tous les faits observés démontrent d'ailleurs que la réflexion du son peut se faire d'une manière remarquablement nette et distincte sur une surface très irrégulière ; un vieux rempart, une tour en ruines, un arbre, une colline, une gorge boisée, voilà les obstacles qui forment les meilleurs échos. L'image lumineuse est d'autant plus pure que la surface qui la forme est plus unie ; l'image sonore n'est pas assujettie à cette condition. Il faut donc croire que, dans la plupart des cas, le mode d'action des surfaces qui forment un écho a quelque analogie avec les effets des miroirs courbes. Peut-être aussi que la résonance des obstacles mêmes et celle des masses d'air qu'ils emprisonnent contribuent pour une large part à la production du phénomène.

Ce qui est certain, c'est que les circonstances dont le concours doit être considéré comme utile ou nécessaire à la formation d'un écho sont loin d'être connues. La théorie et l'expérience sont ici également en défaut. Dans quelques cas, il est vrai, les dispositions locales qui, d'après la théorie des réflexions, doivent donner un écho d'une certaine nature, le donnent en effet ; mais souvent notre attente est trompée sans qu'il soit possible d'en découvrir la raison.

Les échos des forêts dépendent peut-être beaucoup du mode de groupement des arbres. Voici quelques faits qui viennent à l'appui de cette opinion.

Dans sa jeunesse, Gay-Vernon s'était souvent amusé à évoquer un écho formé par les bâtiments d'un moulin. Après avoir passé quelques années à Paris, il revint à son village. Quel ne fut pas son étonnement lorsqu'il s'aperçut que son écho n'existait plus ! Rien n'était changé au moulin ; on avait seulement abattu un groupe d'arbres qui l'ombrageaient.

Dans la plaine de Montrouge, près de Paris, il y avait autrefois un écho remarquable formé par un mur au-devant duquel étaient plusieurs rangées d'arbres. Hassenfratz essaya de se rendre compte des circonstances dont le phénomène pouvait dépendre. Il plaça à une certaine distance un aide chargé de produire le son dont il voulait observer la réflexion, puis il s'approcha lentement du mur, écoutant toujours. Il constata que l'écho s'évanouissait à mesure qu'il s'en rapprochait ; cependant il restait encore une résonance sourde qui venait, non pas du mur, mais des arbres ; en collant l'oreille à leurs troncs, on les sentait en effet frémir, tandis que le mur ne paraissait pas vibrer du tout.

Hassenfratz a observé que les murs de certaines maisons donnaient un écho quand les fenêtres étaient fermées ou bien lorsqu'elles étaient ouvertes, mais que l'on fermait les portes. Dans quelques souterrains, les échos ne se produisent que sous l'influence de certaines notes déterminées. L'écho de l'ancien collège d'Harcourt offrait une autre particularité curieuse. Il répétait la voix d'un homme placé au milieu de la cour, mais les

notes graves s'entendaient dans la direction de la rue de la Harpe, les notes aiguës dans une direction qui était de 50° plus rapprochée du nord.

Tous ces faits montrent bien que l'écho est une personne exigeante, dont il n'est pas toujours facile de deviner les caprices.

Les nuages répercutent aussi les bruits terrestres. Les membres du Bureau des longitudes, pendant les expériences qu'ils firent pour mesurer la vitesse du son, constatèrent que le bruit du canon était accompagné d'échos toutes les fois qu'un nuage passait sur leurs têtes. Le roulement du tonnerre s'explique en grande partie par les réflexions multiples que le son éprouve entre le sol et la nuée orageuse. Les aéronautes entendent l'écho de leur voix que le sol leur renvoie : ce serait le dernier lien qui les rattacherait à la terre, si la pesanteur et les fuites de gaz ne se chargeaient de les ramener au bercail.

Les toiles des navires et les vagues très hautes forment écho également. Les paroles que l'on crie dans un porte-voix reviennent si elles rencontrent les surfaces convexes des voiles d'une escadre. D'après Brandes, si l'on se trouve au bord de la mer par une soirée calme, on entend la voix revenir du côté de l'eau. Le fait qu'un écho multiple peut naître en plein air, sous un ciel serein (par réflexion sur des nuages acoustiques invisibles) est confirmé par les expériences de M. Tyndall. Biot a observé, de son côté, un écho formé à l'intérieur d'une conduite souterraine ouverte.

C'est surtout dans le silence de la nuit que les échos sont distincts ; les bruits du jour les empêchent d'être nettement perçus. Mersenne rapporte que l'écho d'Ormesson, dans la vallée de Montmorency, répond qua-

torze syllabes la nuit, et seulement sept le jour. D'après le Dr Plot, il y avait dans le parc de Woodstock un écho qui répétait 17 syllabes le jour, et 20 la nuit, la distance étant de 700 mètres.

On peut observer des échos multiples sous les arches des grands ponts suspendus dont les piles sont suffisamment espacées; les réflexions successives sur les piles opposées multiplient le son à l'infini s'il a une certaine intensité. Dans les vallées profondes, les échos se forment aussi très facilement. Les berges creusées par les eaux d'une rivière donnent souvent des échos très remarquables.

Un écho bien connu est celui qui existe entre Coblentz et Bingen, là où les eaux de la Nahe se jettent dans le Rhin. Il répète dix-sept fois, et la voix semble alternativement s'éloigner et se rapprocher. On aime à l'évoquer par des coups de feu pour amuser les touristes. Ebell parle d'un écho qui existerait à Derembourg (près de Halberstadt) et qui répéterait vingt-sept syllabes. Les échos de Rosneath, sur les rives de la Clyde, en Écosse, — de Killarney, en Irlande, — de l'Ochsenthal, près de Rosenlaui en Suisse, sont célèbres par la douceur des sons réfléchis, qui semblent mourir peu à peu en s'éloignant.

A Genetay, à deux lieues de Rouen, il existe un écho remarquable dans une grande cour semi-circulaire. Quand on la traverse en chantant, on n'entend que sa propre voix, et les auditeurs placés en d'autres points n'en entendent que l'écho, qui est simple ou multiple, selon leur position.

A trois lieues de Verdun, deux tours distantes d'environ 50 mètres et isolées du bâtiment principal dont elles dépendent, produisent un écho qui répète 12

ou 13 fois, avec une intensité toujours décroissante, un son proféré au milieu de l'espace qui les sépare. Lorsqu'on s'écarte de la ligne droite qui joint les deux tours, l'écho cesse de manifester, mais entre le bâtiment et l'une des tours on retrouve un écho simple.

Dans les environs d'Heidelberg, on rencontre un écho qui imite le bruit du tonnerre. Pour l'évoquer, on tire un coup de pistolet à la base du Heiligenberg; une gorge boisée qui s'ouvre en face réfléchit le son de telle sorte que des personnes qui, placées en arrière et au-dessus du tireur, ne distinguent pas le coup de feu primitif, en entendent l'écho sous la forme d'un roulement prolongé.

En Bohême, on trouve, près d'Aderbach, une espèce de cirque de six lieues de diamètre, hérissé de rochers nus et pointus. Au milieu de ce chaos il existe un endroit où l'écho répète trois fois une phrase de sept syllabes, sans la moindre confusion. A quelques pas de là, on n'entend plus rien.

Dans les murs d'Avignon, Kircher a trouvé que la voix était répétée jusqu'à huit fois. Dans la ville de Rome, les échos répètent un cri de deux à sept fois. Boissard, dans sa *Topographia romana*, donne la description du tombeau de Cœcilia Metella, célèbre par les échos qu'il produit. C'est une tour ronde, dont les murs sont épais de 24 pieds et ornés de deux cents têtes de bœufs en marbre, en souvenir des deux hécatombes immolées aux funérailles de la fille de Metellus Crassus. Ce monument est situé près de Saint-Sébastien; le peuple l'appelle *Capo di bove*. Lorsqu'on prononce à voix haute une phrase quelconque au pied de la colline qui porte la tour, il se produit un écho multiple. Boissard dit qu'ayant chanté à cet écho le premier vers de

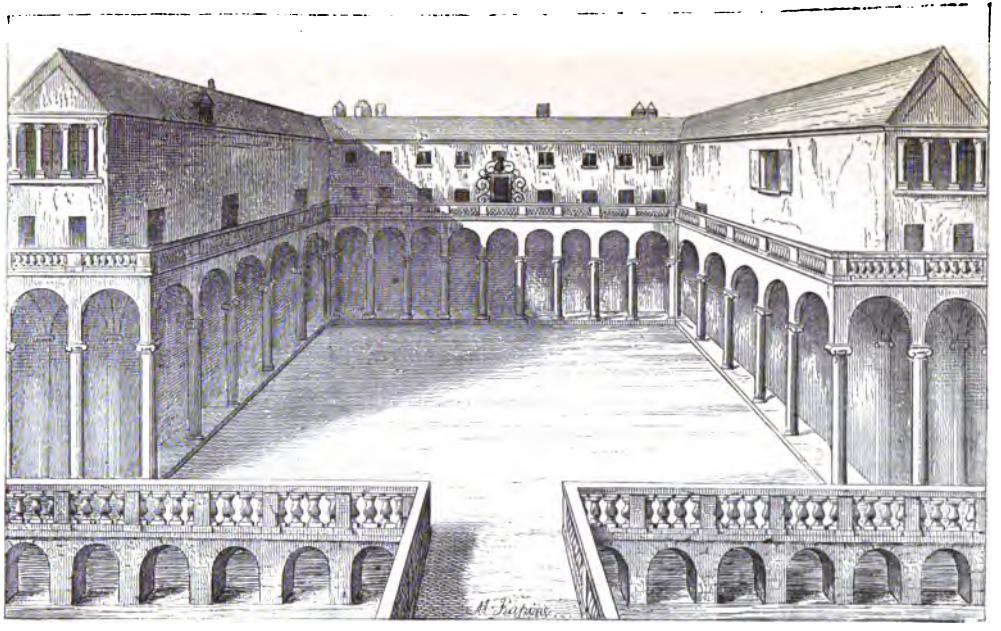


Fig. 55. La villa Simonetta, près de Milan.

l'*Enéide*, il l'a entendu répéter d'abord huit fois distinctement, puis encore plusieurs fois d'une manière plus confuse. Le P. Mersenne, qui parle aussi de cet écho célèbre, fait à ce propos les réflexions suivantes : « L'on voit encore, dit-il, la place dans laquelle on immolait des hécatombes, dont le retentissement faisait croire le sacrifice plus grand qu'il n'était. A savoir si le lieu s'est ainsi trouvé ou s'il a été choisi pour une plus grande vénération et célébration de sacrifices, ou s'il a été destiné pour la sépulture de ceux de la maison de Crassus et pour les immortaliser en quelque façon, afin que leur nom se multipliât à la postérité ; j'en laisse le jugement à part. Il est vrai qu'au logis d'un particulier, l'écho n'est guère agréable, car il fait entendre bien loin tout ce qui se dit et tout ce qui se fait ; il n'y a qu'aux degrés et aux grandes salles et lieux de plaisance où l'on doive le souhaiter. Quant aux églises, s'il sert pour faire entendre un prédicateur, il l'interrompt aussi et l'importune beaucoup, entrecoupant sa parole par son retentissement. »

L'un des échos les plus célèbres est celui qui existe à la villa Simonetta, près de Milan, dont nous reproduisons le dessin donné par Kircher. La longueur du corps de logis principal est de 62 aunes milanaises (37 mètres), mesurées à l'intérieur de la cour; les deux ailes latérales ont 33 aunes (20 mètres). La hauteur de l'étage supérieur, mesurée entre la galerie et le toit, est de 16 aunes (10 mètres) ; la galerie a une largeur d'environ 5 mètres. Lorsqu'on tire un coup de pistolet de la grande fenêtre percée dans le mur de l'étage supérieur de l'aile gauche (à droite dans le dessin), l'écho le répète de quarante à cinquante fois; le bruit de la voix est répété de 24 à 30 fois. Addison et Monge ont eu l'occa-

sion de vérifier le fait. Bernoulli prétend même qu'il a compté un jour jusqu'à 60 répétitions.

Dans les édifices voûtés on observe souvent de singuliers effets d'échos qui s'expliquent d'une manière plus ou moins complète par les propriétés des courbes géométriques. L'ellipse est une courbe allongée, semblable à un cercle aplati ; à l'intérieur du contour sont deux points *f*, *f* (fig. 36) qu'on appelle les *foyers* parce que chacun d'eux reçoit la totalité des rayons lumineux ou sonores qui, partis de l'autre, se sont réfléchis sur le

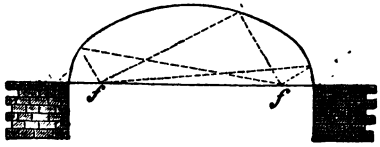


Fig. 36. Ellipse.

contour intérieur de la courbe. Une personne postée à l'un des foyers d'une voûte elliptique entend parfaitement les paroles prononcées à voix sourde au foyer opposé. Deux personnes qui se placent aux deux extrémités d'un mur bâti en hémicycle allongé peuvent ainsi converser à voix basse sans être entendues en aucun autre point. Un mur de ce genre existe ou existait à Muyden, près d'Amsterdam.

Les surfaces paraboliques ont un seul foyer, où viennent converger les rayons qui arrivent parallèles. Au contraire, les rayons qui partent du foyer deviennent parallèles après la réflexion. Dès lors, si on installe vis-à-vis l'un de l'autre deux miroirs paraboliques, on entend au foyer de l'un le plus léger bruit qui se produit au foyer de l'autre, ainsi que cela se voit dans la

figure 37. C'est cette propriété des surfaces paraboliques qui les fait choisir pour les réflecteurs installés sur les phares et destinés à envoyer au loin la lumière des feux ou le son d'une cloche; elles transforment en faisceau parallèle les rayons divergents partis du foyer. On les choisit aussi, avec moins de raison assurément, pour les cornets acoustiques. Dans ce cas, on suppose qu'elles condensent à leur foyer, où se place l'oreille, les rayons sonores qui arrivent d'une certaine distance, absolument comme un miroir parabolique

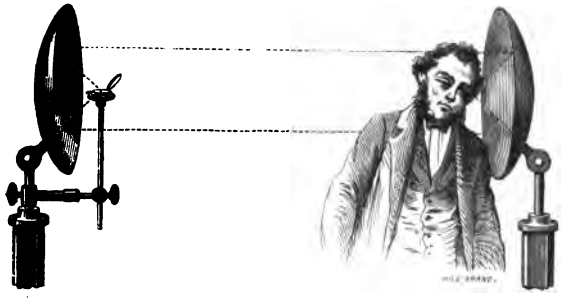


Fig. 37. Miroirs paraboliques.

concentre à son foyer les rayons solaires. Les voiles des navires produisent quelquefois cet effet lorsqu'elles sont gonflées par le vent. Arnott raconte que, sur un bâtiment qui côtoyait le Brésil, il suffisait de se placer en un point déterminé en avant de la grande voile pour entendre les cloches de San Salvador, éloignées alors de 180 kilomètres.

Les murs d'enceinte, les voûtes d'églises, les caves, etc., offrent quelquefois accidentellement une de ces dispositions qui explique alors les effets d'acoustique dont nous avons déjà parlé dans un précédent chapitre.

Dans une voûte elliptique, le son parti d'un point déterminé peut se concentrer tout entier en un autre point déterminé, après une réflexion simple sur les murs. Entre deux voûtes paraboliques opposées le même effet s'obtient, d'une manière moins complète, il est vrai, par une double réflexion[1]. On peut maintenant concevoir d'autres systèmes de courbes qui donneraient le même résultat par un plus grand nombre de réflexions successives; ainsi deux paraboles combinées avec un mur droit le réaliseraint par trois réflexions (fig. 38). Il est donc possible que le jeu des réflexions multiples explique dans beaucoup de cas les effets en question. Dans d'autres cas, comme dans celui des coupoles circulaires, on ne voit pas comment la réflexion pourrait rendre compte des phénomènes observés. Ce qui en rend l'explication si difficile, c'est que les conditions dans lesquelles ces phénomènes se produisent sont rarement indiquées par les auteurs avec une précision suffisante, de sorte qu'on flotte entre une foule d'hypothèses que ces descriptions incomplètes autorisent plus ou moins.

Une des salles du musée des antiques, au Louvre, forme un écho particulier qui s'explique par la disposition du plafond.

Dans les voûtes fermées, les échos multiples produisent quelquefois un renforcement extraordinaire du son. On sait que, dans un des caveaux du Panthéon, le gardien qui les fait visiter n'a qu'à donner un coup sec sur le pan de sa redingote, pour faire éclater, sous ces voûtes retentissantes, un bruit comparable à un coup

1. Les rayons qui, du foyer de la première parabole, tombent droit sur le contour de la seconde, ne sont point réfléchis vers le foyer de celle-ci; ils se perdent évidemment.

de canon. Le même phénomène s'observe dans l'*Oreille de Denys* et dans la célèbre *grotte de Mammouth*, que l'on a découverte dans le Kentucky, au sud de Louisville.

Olaus Magnus rapporte qu'il existe près de Viborg, en Finlande, une caverne miraculeuse dans laquelle il suffit de jeter un animal vivant pour qu'il en sorte une immense et épouvantable clameur. C'est la caverne de

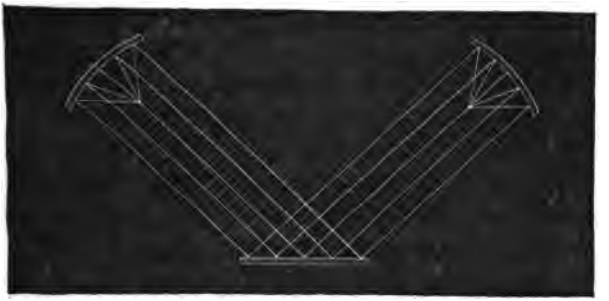


Fig. 38. — Deux paraboles.

Smellen. Pline raconte quelque chose d'analogue d'une caverne située en Dalmatie, dans laquelle on n'a qu'à jeter une pierre pour exciter un bruit d'ouragan.

Une autre analogie remarquable du son et de la lumière consiste dans la *réfraction* que les rayons sonores subissent, comme les rayons lumineux, lorsqu'ils passent d'un milieu dans un autre. Une cuiller que l'on trempe dans un verre d'eau semble se déformer; on dirait qu'elle se brise au niveau du liquide; c'est un effet de réfraction. Les rayons qui sortent de l'eau dans une direction inclinée se réfractent, c'est-à-dire changent de direction au moment où ils pénètrent

dans l'air; la déviation est d'autant plus grande que l'incidence est plus oblique. Les effets des prismes et des lentilles reposent sur les réfractions successives que la lumière éprouve en passant d'abord de l'air dans le verre, puis du verre dans l'air; on travaille les surfaces du verre de manière à obtenir toutes les déviations voulues.

Les rayons sonores éprouvent des déviations semblables au moment où ils changent de milieu. M. Hajech l'a constaté de la manière suivante. Ayant percé un trou dans le mur de séparation de deux chambres, il y fixa un tube fermé par deux membranes. Ce tube était successivement rempli d'eau, d'acide carbonique, d'hydrogène, de gaz ammoniac, etc. A l'une de ses extrémités s'ajustait un autre tube rempli d'air et terminé par une boîte où se trouvait une montre à réveil. La boîte était ouatée à l'intérieur pour empêcher le son de pénétrer au dehors; il parcourait donc les tubes en traversant le gaz et le liquide qui remplissait l'espace compris entre les deux membranes, et l'observateur placé dans la chambre opposée cherchait la direction dans laquelle le son transmis paraissait avoir le plus de force. Cette direction était celle de l'axe même, quand les deux membranes étaient tendues en travers de l'axe des tubes; dans ce cas, la déviation n'existait donc pas. Mais dès que la membrane antérieure était inclinée par rapport à l'axe, on observait une déviation sensible, que l'on mesurait en suivant un arc de cercle tracé sur le plancher et en tenant l'extrémité d'un fil à plomb au-dessous de l'oreille. Ces mesures ont montré que la réfraction des rayons sonores est assujettie aux mêmes lois que celle des rayons lumineux : elle dépend de l'angle sous lequel les rayons rencontrent la surface réfringente

et du rapport des vitesses respectives avec lesquelles le son se propage dans les deux milieux. Elle est la même pour les sons qui entrent dans l'air après avoir traversé l'eau que pour ceux qui ont traversé l'hydrogène, parce que la vitesse est la même dans l'hydro-

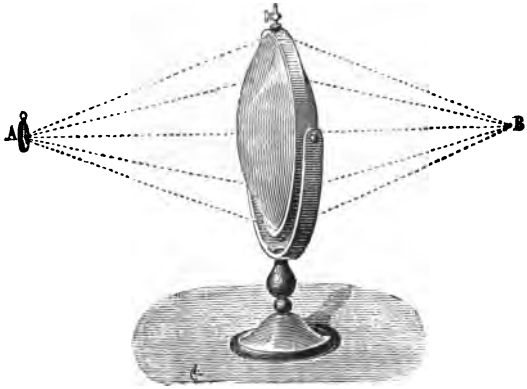


Fig. 39. — Réfraction du son.

gène et dans l'eau; elle est très différente pour les sons qui émergent de l'acide carbonique.

M. Sondhauss a observé la réfraction du son au moyen d'une lentille en collodion, gonflée avec de l'acide carbonique. En plaçant une montre sur l'axe de cette lentille, on constatait facilement que le son était concentré dans un autre point de l'axe, du côté opposé : là était le foyer, et le bruit de la montre s'y distinguait nettement; on cessait de l'entendre dès qu'on enlevait la lentille (fig. 39). L'observation se fait plus commodément à l'aide d'un résonateur d'Helmholtz, qu'on promène devant la lentille, en enfonçant dans l'oreille le bout d'un tube de caoutchouc attaché à ce globe.

Le P. Mersenne n'avait pas oublié de se demander « si les sons se rompent, c'est-à-dire s'ils endurent de la réfraction comme la lumière quand ils passent par des milieux différents. » Mais il se borne à expliquer comment la réfraction a lieu pour la lumière et comment elle conduit à tailler des lentilles qui grossissent les objets; puis il ajoute : « Je ne croy pas que les rayons des sons soient susceptibles de ces figures par l'industrie des hommes; car, quant aux anges, s'ils disposent des tremblements de l'air comme il leur plaist, je ne doute pas qu'ils ne pussent faire la même chose des sons que de la lumière. »

VII

RÉSONANCE

Résonance. — Vases de Vitruve. — Tables d'harmonie. — Résonateurs. — La corde sensible. — Verres brisés par la voix. — Acoustique des églises et des salles de spectacle.

Si nous avons dit que le son tourne les obstacles, il ne faut pas prendre cela d'une manière trop absolue. Les corps très massifs l'arrêtent plus ou moins complètement, comme un écran opaque arrête la lumière. Deux personnes séparées par une élévation de terrain et qui ne peuvent pas se voir, s'entendent néanmoins, parce que le son passe au-dessus de l'obstacle que la lumière ne peut franchir; mais elles s'entendraient beaucoup plus facilement si cet obstacle n'existait pas, car il a pour effet d'affaiblir le son. Dans le cas où le son est guidé par un tuyau ou par quelque autre canal fermé, il se propage très bien sans diminution sensible suivant une ligne courbe quelconque; dans l'air libre, il s'amoindrit en quittant la direction dans laquelle il a été émis. C'est un fait que vient confirmer l'expérience de tous les jours. Chacun sait, par exemple, que pour

bien entendre un orateur, il faut se placer autant que possible en face de la tribune. De même, pour mieux distinguer un bruit très faible, on tourne instinctivement l'oreille du côté d'où il vient.

Quand le flux sonore rencontre un obstacle qui l'oblige de s'écarter de la ligne droite, il peut donc encore pénétrer du côté opposé, comme un courant qui se referme derrière une île, mais il en résulte toujours une diminution d'intensité. C'est ainsi que les *digues criblantes*, que l'on construit en éparpillant des blocs des rochers dans le lit d'un fleuve, ont pour effet d'en ralentir le cours.

Un obstacle très large et très massif amortit le son au point de le rendre imperceptible, et produit ce qu'on appelle une *ombre sonore*. Sous les arches des grands ponts, vous trouvez facilement à vous placer de manière que les bruits du dehors ne vous atteignent pas. Derrière la masse d'eau verticale de la chute du Rhin à Schaffhouse, on se trouve dans un silence complet. Dans les rues, près des maisons, on entend souvent le son d'une cloche, dans une direction tout autre que celle où se trouve le clocher; c'est que les maisons font ombre au son direct et qu'on n'entend que celui qui est réfléchi par les murs placés du côté opposé. La *Roche sourde*, dont parle le P. Kircher, mérite d'être citée comme exemple d'une ombre sonore très complète.

Les corps élastiques, surtout ceux qui n'offrent qu'une faible masse, ne forment guère obstacle à la propagation du son dans l'air. Il les traverse tambour battant. Ces sortes de corps ne sauraient donc être d'un grand secours pour obtenir de l'ombre sonore; ce serait comme si on voulait opposer à la lumière des écrans

de verre. Une cloison de planches, une muraille de peu d'épaisseur, laissent passer toute espèce de bruit; c'est ce qui rend les chambres d'hôtel si désagréables.

La transmission du son par les corps élastiques est accompagnée de phénomènes de résonance. La matière élastique devient elle-même sonore, et on la sent frémir sous la main. La même chose s'observe lorsqu'une surface élastique réfléchit le son. Il y prend appui comme sur un tremplin pour s'élancer avec plus de force. C'est ce qui explique pourquoi les échos ont quelquefois une si grande intensité. En même temps, d'autres sons, dont l'origine est dans la surface réfléchissante, viennent parfois se mêler faiblement au son primitif: il est renvoyé avec une escorte. On dit alors que la surface *résonne*. C'est ainsi qu'un corps sur lequel se réfléchissent les rayons solaires finit par s'échauffer lui-même et par rayonner de la chaleur dans tous les sens.

Ce qu'on appelle ordinairement la *résonance des voûtes* est un phénomène complexe, dû autant à la réflexion qu'à la résonance proprement dite. Le son, répercuté par les murs d'une voûte élevée, revient trop vite pour qu'il y ait un écho sensible, et cependant pas assez vite pour qu'il se confonde avec le son direct, ainsi que cela aurait lieu dans une chambre de dimensions modérées. Il empiète donc sur ce dernier et le rend confus en s'y mêlant d'une manière irrégulière. En même temps, les vibrations des murs qui frémissent et résonnent sous l'influence de la voix qui les frappe, apportent un nouvel élément de trouble dans le phénomène général. A chaque appel de la voix répondent mille bruits confus, dont le mélange chaotique produit ces effets si remarquables dont nous avons parlé à pro-

pos des échos. On les observe souvent quand on passe, par exemple, à bord d'un bateau à vapeur sous un pont dont les piles et les arches renvoient le clapotage des roues en le renforçant. Lorsqu'une locomotive lancée à grande vitesse passe au-dessous d'un pont, la réflexion du bruit sur les culées produit une sorte d'explosion violente. Le vacarme devient assourdissant dans un tunnel d'une longueur un peu considérable.

Les nappes d'eau favorisent beaucoup ces effets par la facilité avec laquelle elles refléchissent le son. Ainsi Cagniard-Latour a constaté que de deux silos dont l'un était à sec tandis que l'autre contenait un peu d'eau, le dernier était beaucoup plus sonore que le premier. Sous les arches des ponts, la résonance devient sensiblement moins forte lorsqu'il n'y a pas d'eau. Les canotiers de la Seine savent aussi que leur voix retentit avec plus de force lorsqu'ils sont en bateau.

On dit qu'un espace est *sonore* lorsqu'il favorise la résonance ; on dit qu'il est *sourd*, lorsqu'il l'empêche. Les draperies, les tapis, toutes les étoffes molles produisent cet effet : elles rendent un espace sourd, comme une tenture noire l'assombrit. C'est pour cela que le meilleur piano a peu de son dans une chambre remplie de tapis et de meubles capitonnés ; c'est quelquefois très heureux pour les voisins. Les appartements vides sont toujours remarquablement sonores.

Dans les églises, dans les salles de séances des assemblées, une résonance trop forte nuit beaucoup à la perception distincte de la parole ; elle couvre la voix de l'orateur et la rend inintelligible. Dans une salle de concert, on ne s'en plaint pas ; là, on cherche au contraire à augmenter la sonorité des murs par un revêtement en boiserie mince.

A l'époque de Rousseau, les orchestres les mieux construits étaient, disait-on, ceux des théâtres d'Italie. On avait soin d'en faire la caisse d'un bois léger et résonnant comme le sapin, de les établir sur un vide avec des arcs-boutants, et d'en écarter les spectateurs par un râteau placé dans le parterre à un pied ou deux de distance. Grâce à cette disposition, le corps même de l'orchestre portant pour ainsi dire en l'air et ne touchant presque à rien, vibre et résonne sans obstacle et forme comme une grande table d'harmonie qui soutient les sons des instruments. A l'Opéra de Paris, l'orchestre était, au contraire, très mal disposé sous ce rapport : enfoncé dans la terre et clos d'une enceinte de bois lourde, massive et chargée de fer, qui étouffait toute résonance. Aujourd'hui ces fosses sonores, vantées par Rousseau, sont adoptées dans la plupart des théâtres spécialement consacrés à la musique. Il est vrai que des architectes compétents les considèrent comme inutiles ou même nuisibles.

Vitruve nous apprend que les Grecs employaient, pour donner plus de sonorité à leurs immenses théâtres, de grandes cloches d'airain, renversées sur des supports coniques et placées dans des niches fermées, sous les gradins[1]. On s'en servait surtout à Corinthe, d'où Mummius les importa à Rome. Quelquefois on se contentait de vases en terre cuite, dont le prix était moins élevé. D'après Vitruve, ces cloches étaient accordées pour certaines notes de la gamme; il explique longuement la manière de les fabriquer et de les distribuer ensuite le long des murs. La figure 40 représente le plan du théâtre de Vitruve, tel que le P. Kircher l'a dessiné

1. Les Grecs appelaient ces vases *échéia*. (ἠχεῖα).

d'après les indications de l'architecte romain. Ce dernier conseille d'accorder les différentes cloches de manière qu'elles donnent la quarte, la quinte, l'octave, la onzième, la douzième et la double octave, ou la série des notes

$$sol\ ut\ ré\ sol_2\ ut_2\ ré_2\ sol_3.$$

Le P. Kircher trouve cet arrangement contraire aux règles de l'harmonie et le remplace par la série suivante :

$$sol\ si\ ré\ sol_2\ si_2\ ré_2\ sol_3,$$

où la tierce est substituée à la quarte, ce qui nous ramène dans l'accord parfait. Il est fort probable que les vases d'airain ne résonnaient pas du tout, mais que l'effet était dû aux masses d'air qu'ils contenaient et à celles qui étaient emprisonnées dans les niches.

Les *tables d'harmonie* des instruments de musique sont des plaques de bois destinées à renforcer les sons trop grêles des cordes par une vigoureuse résonance. Les cordes offrent trop peu de surface pour ébranler directement une grande masse d'air; elles la coupent sans la repousser; il faut donc les tendre sur un tablier de bois, qui reçoit les vibrations et les propage d'une manière plus efficace. De même, une fourchette d'acier a incomparablement plus de son lorsqu'elle est appuyée sur une surface de bois : c'est pour cette raison que l'on fixe les diapasons sur une caisse de bois pour en augmenter la sonorité. Mais il y a encore autre chose : la table de la caisse fait résonner la masse d'air qu'elle renferme, et c'est cette résonance qui donne tant de volume au son du diapason. Il faut pour cela que la boîte soit d'une dimension en rapport avec la

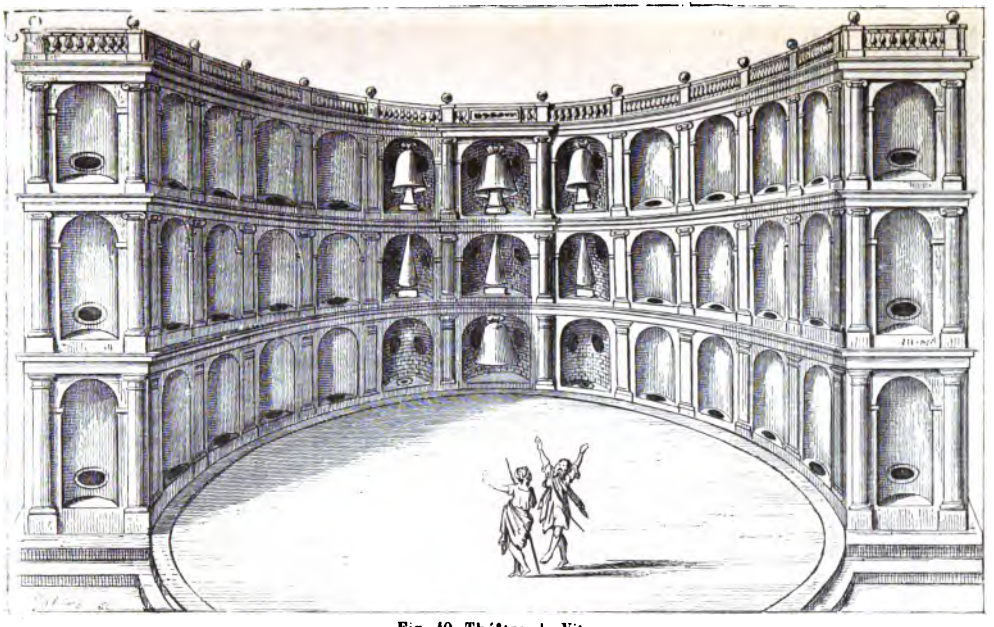


Fig. 40. Théâtre de Vitruve.

note qu'elle doit renforcer, autrement elle serait sans effet.

Les corps élastiques d'une forme déterminée : tiges, cordes, plaques, membranes, masses d'air limitées, etc., ont des sons propres, qu'ils rendent lorsqu'on les ébranle, et qu'ils renforcent aussi de préférence par résonnement. C'est ce que nous expliquerons plus claire-

Fig. 41. Résonateur.

ment dans la suite. Le volume d'air contenu dans la caisse d'un diapason a donc sa note spécifique, et il faut que cette note soit d'accord avec celle du diapason pour qu'il y ait résonance et renforcement du son [1].

M. Helmholtz a tiré parti de cette remarque pour créer un instrument qui permet d'analyser un mélange confus de sons. C'est le *résonateur*, appareil fort simple qui se compose d'une sphère creuse en verre ou en métal, percée de deux ouvertures dont l'une est sur-

1. D'après une remarque de M. Kœnig, le diapason vibre très fortement, mais ces vibrations s'éteignent très vite, lorsqu'il est exactement à l'unisson de la caisse : elles durent plus longtemps si l'accord n'est pas parfait. Les mêmes effets s'observent lorsqu'on renfonce le diapason par un résonateur.

montée d'une espèce de pavillon, l'autre d'un appendice pointu que l'on introduit dans l'oreille. L'instrument se manie plus facilement si on prolonge l'appendice postérieur par un tube de caoutchouc à bout d'ivoire que l'on enfonce dans le conduit auditif; en même temps, il est bon de se boucher l'autre oreille avec un tampon de cire rouge. Le volume intérieur de cette espèce de poire et les dimensions de l'orifice libre déterminent la note sous l'influence de laquelle il résonne; pour connaître cette note, on n'a qu'à souffler contre le bord de l'orifice, elle se produit alors d'elle-même. Si cette note existe dans un bruit quelconque, on l'entend fortement résonner dans le globe; toute autre note est sans effet. On a donc ainsi le moyen de découvrir l'existence de cette note au milieu d'autres sons qui la couvriraient complètement pour l'oreille nue. Une série de résonateurs de dimensions diverses permet de faire une véritable analyse des bruits, surtout si on leur donne une forme cylindrique afin de pouvoir en faire varier les dimensions par des tubes de raccord. Nous verrons plus loin l'importance de ce moyen d'analyse pour les recherches d'acoustique.

Avec deux diapasons accordés pour la même note, on peut observer un autre phénomène de résonance qui est très frappant. On les installe aux deux extrémités d'une salle, les ouvertures de leurs caisses braquées l'une sur l'autre. On fait vibrer l'un pendant quelques secondes par des coups d'archet répétés, puis on l'arrête brusquement en posant la main dessus. Le son néanmoins ne s'éteint pas, il vient seulement de plus loin : c'est l'autre diapason qui est entré de lui-même en vibration et qui donne la réplique au premier.

La communication des vibrations sonores se fait ici

par l'intermédiaire des caisses et de la colonne d'air qui les sépare : le premier diapason fait résonner sa caisse et le volume d'air qu'elle contient, l'atmosphère transmet le mouvement à l'air contenu dans la caisse de l'autre diapason ; cette caisse commence à vibrer elle-même et le diapason qu'elle porte suit tous ses mouvements.

Un violon ou un instrument à cordes quelconque résonne aussitôt qu'on produit à quelque distance une des notes pour lesquelles ces cordes ont été accordées ; il demeure muet lorsque les notes que l'on produit sont en désaccord avec celles qu'il peut rendre. De là le dicton de la *corde sensible.*

La *résonance élective,* s'il est permis d'employer ce mot, s'observe souvent sous la forme d'une simple vibration mécanique, sensible au toucher, parce qu'on ne distingue pas le son de résonance du son primitif. Kircher parle d'une grande pierre qui frémissait toujours au son d'un certain tuyau d'orgue ; Mersenne rapporte une observation toute semblable. Boyle dit que les stalles tremblent souvent au son des orgues, qu'il les a senties frémir sous sa main au son de l'orgue ou de la voix, mais que celles qui étaient bien fortes tremblaient toutes à quelque ton déterminé. On a souvent cité ce fameux pilier d'une église de Reims qui s'ébranle sensiblement au son d'une certaine cloche tandis que les autres piliers restent immobiles ; « mais ce qui ravit au son l'honneur du merveilleux, ajoute Rousseau en commentant cette histoire, est que ce même pilier s'ébranle également quand on a ôté le battant de la cloche. » Il serait alors difficile de comprendre ce qui mettait le pilier en mouvement ; le fait tel qu'il est rapporté par les auteurs n'a en lui-même rien qui puisse nous paraître extraordinaire.

C'est ici le lieu de parler d'une expérience ou d'un tour célèbre qui consiste à briser un verre avec la voix. On sait que chaque verre a sa note spécifique ; il la fait entendre lorsqu'on le frappe avec une cuiller, lorsqu'on le rapproche d'un autre verre pour trinquer, et aussi lorsqu'il se casse. Eh bien, il paraît que, si un homme qui a la voix forte et très juste, entonne cette note en se penchant sur l'orifice du verre, il peut le faire éclater au bout de quelques instants. D'après Bartoli[1] et Morhof[2], il suffirait quelquefois de donner l'octave de la note en question; les verres minces et bombés seraient les plus propres à faire réussir l'expérience; le son d'un violon produirait le même effet, tandis qu'on ne l'obtiendrait pas avec une trompette. Un physicien allemand raconte que, dans sa jeunesse, il a vu exécuter ce tour dans un cabaret, par un homme qui en faisait son métier : il rangeait plusieurs verres devant lui sur la table, les frappait l'un après l'autre avec une petite clef afin de connaître leur note, puis se penchait dessus et donnait cette même note d'une voix brève et forte : le verre éclatait toujours. Rien ne prouve, il est vrai, que les verres n'aient pas été préparés; on faciliterait singulièrement le tour en les entamant par un imperceptible trait au diamant.

Ce qui est très curieux, c'est que la première mention de faits de ce genre se trouve dans le Talmud. Voici la traduction du passage en question (*Baba Kama*, fol. 18, c. H) : « Il a été dit par Ramé, fils de Jécheskel : Lorsqu'un coq aura tendu son cou dans le creux d'un vase de verre et aura chanté dedans de manière à le

1. *Trattato del suono*. Bologna, 1680.
2. *Stentor hyaloclastes*. Kil., 1683.

briser, on payera le dommage entier. Et Raf Joseph a dit : Voici les paroles de l'école du Maître : Un cheval qui hennit, un âne qui brait et casse un vase, paie la moitié du dommage. » Si les écrivains du Talmud ont simplement inventé ces points litigieux, on doit dire qu'ils avaient l'imagination féconde.

Les phénomènes de résonance, nous venons de le voir, sont toujours accompagnés de mouvements vibratoires très sensibles des corps élastiques qui produisent ces phénomènes. Nous ne tarderons pas à généraliser cette remarque et à reconnaître que tous les sons résultent de vibrations d'une matière élastique quelconque, de sorte qu'il est permis de définir le son *un mouvement vibratoire perceptible à l'oreille.* Mais avant d'y arriver, nous devons nous arrêter un instant à un sujet qui se rattache intimement aux phénomènes qui viennent d'être exposés : nous voulons parler de l'acoustique des salles de spectacle, amphithéâtres, églises, etc., problème épineux et qui n'a été encore étudié que d'une manière très insuffisante. Comment faut-il construire une salle pour que le son qui émane d'un point déterminé s'y transmette distinctement dans toutes les directions ?

Les anciens avaient des *amphithéâtres* circulaires ou elliptiques dont les gradins entouraient l'arène, et des *théâtres* en hémicycle, avec une scène sans profondeur, enclose dans les murs épais et solides. Les gradins se développaient à partir de la scène suivant la loi d'un cône évasé ; tout cela représentait en quelque sorte un immense porte-voix qu'embouchaient les acteurs. Mais ces monuments étaient ouverts au ciel, sauf le cas où on le recouvrait des *velaria,* immenses toiles destinées à abriter les spectateurs et la scène contre les ardeurs du

soleil. Ces tentures ne pouvaient manquer de réfléchir le son, mais ce n'est point là-dessus que comptaient les architectes. Ils se contentaient de disposer les gradins de manière que la voix des acteurs pût monter sans obstacle à tous les auditeurs dont le nombre était quelquefois de plusieurs milliers. Il est très probable que ce but se trouvait généralement atteint, à en juger d'après ce qu'on peut encore constater aujourd'hui dans les ruines d'anciens cirques ou théâtres. On y entend très bien sur les gradins les plus éloignés la moindre parole prononcée dans l'arène. Le théâtre de la villa d'Adrien, à Tivoli, le cirque de Murviedro et l'amphithéâtre de Nîmes sont, dit-on, très remarquables sous ce rapport.

Le seul artifice que les anciens architectes aient imaginé pour augmenter la sonorité de leurs théâtres, c'est l'emploi des vases renforçants dont nous avons déjà parlé plus haut.

Les affaires publiques se traitaient aussi en plein air, dans l'enceinte appelée *forum*. On se divertissait, on tenait conseil, on se haranguait sous la voûte du ciel bleu. Aujourd'hui que la civilisation a quitté son berceau pour habiter sous des climats plus rudes, il a fallu remplacer cette architecture naïve par des salles de spectacles ou de concerts, des cirques, des amphithéâtres, des salles d'assemblées politiques, sans compter les églises. Les plafonds, les piliers, les stalles et les loges apportent dans la propagation du son un trouble profond par les réflexions et les résonances qui résultent de la présence de ces obstacles. Il faut donc entrer dans des considérations d'un ordre complètement nouveau pour découvrir les principes d'acoustique applicables aux constructions modernes.

Les voûtes circulaires sont en général d'un mauvais effet : elles donnent lieu à une résonance trop forte et trop prolongée. Sous la coupole de Saint-Paul, à Londres, il vous semble entendre les sons courir le long des murailles. Dans la Rotonde, à Rome, cet effet est, dit-on, si bizarre, que beaucoup de gens n'assistent au prêche dans cette église que pour entendre le jeu des

Fig. 42. Arènes de Nîmes.

résonances. Toutefois il paraît que cet inconvénient n'existe pas dans la salle de concert circulaire de l'Académie des beaux-arts de Berlin; il est vrai que les murs y sont percés d'un grand nombre d'embrasures très profondes.

Les voûtes ou salles elliptiques n'ont aucune raison d'être, puisque l'ellipse n'est propre qu'à concentrer en un seul point les rayons partis d'un autre point. La parabole, qui rend parallèles les rayons divergents,

se recommande davantage; la chaire ou la tribune de l'orateur se placerait au foyer de la courbe. Chladni propose d'arrondir en parabole le fond d'une salle rectangulaire (fig. 43): cette combinaison se rencontre dans quelques anciennes basiliques. On pourrait compléter l'effet en donnant une courbure parabolique à la voûte du plafond. Des abat-voix ou dais de cette forme sont employés au-dessus de la chaire dans quelques églises; leur mode d'action est le même que celui des réflecteurs en usage dans les phares.

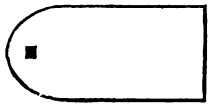


Fig. 43.

Dans une salle de concert ou de conférences, il y aurait avantage à construire au-dessus de la tribune une portion de voûte sphérique dont l'axe serait incliné

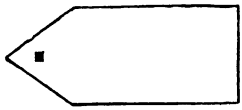


Fig. 44.

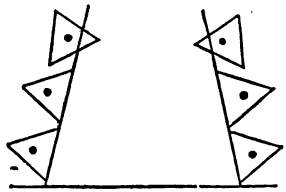


Fig. 45.

vers le centre de la salle. Une autre idée de Chladni est d'établir la tribune sous une espèce de cornet maçonné, en forme de demi-cône (fig. 44); mais il reconnaît lui-même que cette construction serait laide et peu praticable. L'orateur s'y trouverait comme au fond d'un antre et risquerait toujours de se cogner la tête contre les parois de son porte-voix.

Dans les théâtres, il faudrait naturellement renoncer à toute espèce de réflecteur disposé derrière la scène.

La seule chose qui mériterait peut-être quelque attention, c'est l'emploi des coulisses triangulaires des anciens, que l'on faisait tourner autour de leurs centres et qui laissaient perdre moins de son que nos coulisses en paravent (fig. 44). Quant à la disposition à donner aux stalles ou banquettes où se placent les auditeurs, l'hémicycle n'est point compatible avec l'exiguïté de nos scènes modernes. Une forme avantageuse serait celle que représente la figure 46; c'est celle d'un ancien théâtre d'Athènes. Le théâtre de Parme, qui est

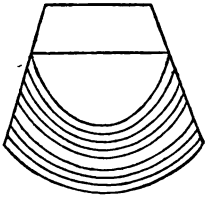


Fig. 46.

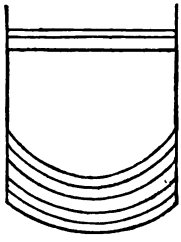


Fig. 47.

célèbre par ses propriétés acoustiques, a la forme représentée figure 47. Les loges d'avant-scène constituent le défaut le plus saillant de nos salles modernes; Zamminer les compare à des souricières où les sons viennent s'étrangler. Malheureusement, l'architecte d'un théâtre est obligé de compter avec les gens qui n'y vont pas pour écouter, mais pour se faire voir.

Dans la construction de nos amphithéâtres et dans celle des églises, on néglige trop souvent les plus simples principes d'acoustique, et on obtient conséquemment des effets détestables. Il est vrai, d'un autre côté, que la science ne peut encore fournir aux architectes que des indications bien précaires et bien vagues.

Le défaut le plus ordinaire est une trop grande sonorité qui empêche les paroles d'être distinctement perçues. L'hémicycle de l'École des beaux-arts, à Paris, est, pour cette raison, une des salles les plus désavantageuses pour s'y faire entendre, quoique assurément une des mieux décorées qui existent. Le grand amphithéâtre de physique et de chimie du Muséum et l'amphithéâtre de physique du Collège de France sont également d'une sonorité fâcheuse. On a essayé d'y remédier par des draperies destinées à rendre les murs plus sourds et par des morceaux de bois disposés pour atténuer les vibrations des banquettes et des gradins, mais ce ravaudage tardif n'a pas produit grand effet. Dans l'église de Saint-Paul, à Boston, qui offre les mêmes défauts, la voix du prédicateur n'est intelligible qu'une fois par an, à la fête de Noël; ce jour-là, l'église est parée d'une manière exceptionnelle et les voûtes sont moins sonores qu'à l'ordinaire.

Le tabernacle des Mormons, immense voûte ovale posée directement sur le sol, offre au contraire de grands avantages : l'orateur s'y fait entendre sans difficulté de 1200 personnes[1].

La forme semi-circulaire que l'on donne si souvent aux amphithéâtres laisse subsister une grande inégalité entre les places situées au centre de l'hémicycle et celles qui sont aux deux extrémités; cette remarque s'applique dans toute sa force à l'amphithéâtre de physique de la Sorbonne; dans celui du Conservatoire des arts et métiers, l'inconvénient se trouve atténué par la disposition de la chaire. La forme la plus avantageuse sera toujours celle qui se rapproche du quart de cercle,

1. J. Siegfried, *Seize mois autour du monde.*

parce que les murs guident alors beaucoup mieux le son vers les auditeurs.

Quant à l'élévation successive des gradins, on les échelonne ordinairement dans les amphithéâtres suivant une ligne droite qui va du plancher à la naissance du plafond. Une ligne à courbure concave serait plus avantageuse, parce qu'elle permettrait de dégager les derniers rangs, en les élevant suffisamment au-dessus de ceux qui sont plus rapprochés du centre. M. Scott Russell, M. Lachèze et d'autres ont proposé diverses courbes pour cet usage.

Le projet le plus original qui ait été imaginé pour améliorer l'acoustique des salles de spectacle est certainement celui que le conseiller intime Langhans communiqua à Chladni; ce projet consiste à diriger de la scène sur les spectateurs un petit courant d'air destiné à leur apporter les paroles des acteurs; on le produirait par une habile ventilation...

VIII

LE SON EST UNE VIBRATION

Origine mécanique des sons. — Cordes et tuyaux. — Instrument de Trevelyan. — Statue de Memnon. — Flammes chantantes. — Flammes sensibles. — Pendule. — Ondulations de l'eau. — Ondes progressives et ondes fixes. — Vibrations des cordes, des tiges, des plaques. — Figures de Chladni. — Figures de Kundt. — Méthode graphique. — Phonographe.

Jusqu'ici nous n'avons encore considéré que les phénomènes sonores qui, pour ainsi dire, tombent sous les sens, en faisant toujours abstraction de la nature intime du mouvement qui les produit. Il est temps d'éclaircir ce point important et de dire que le son ne peut avoir d'autre origine que les vibrations d'un corps dondérable.

Les phénomènes de la résonance nous conduisent déjà à cette conclusion.

En effet, comment expliquer les frémissements des stalles et des piliers des églises aux sons de l'orgue, les trépidations de la table d'harmonie d'un instrument de musique, tant d'autres faits du même genre, à moins d'admettre que le son résulte de certaines vibrations des

corps sonores, transmises à distance par l'air ou par un autre milieu quelconque?

L'expérience vulgaire nous montre qu'un son un peu fort est toujours accompagné de vibrations sensibles au toucher. Les tambours qui passent dans la rue ébranlent les vitres de nos croisées. Un coup de canon fait trembler le sol ; les hommes qui se trouvent à peu de distance de la pièce éprouvent une forte secousse à la poitrine. Dans un concert, on n'a qu'à tourner l'ouverture d'un chapeau du côté de l'orchestre en touchant légèrement le fond du bout du doigt, pour y sentir aussitôt les frémissements de l'air.

Fig. 48.

Dans beaucoup de cas, il est très facile de s'assurer directement que le son ne peut pas se produire sans un mouvement vibratoire concomitant. Une corde tendue que l'on fait résonner exécute des oscillations qui deviennent visibles grâce à la persistance des impressions lumineuses : elle prend la forme d'un fuseau (fig. 48) parce que l'œil en voit à la fois les positions extrêmes. C'est pour la même raison que les contours d'un diapason un peu grand deviennent confus dès qu'il entre en vibration sonore. Pour constater les oscillations d'une corde horizontale, on peut aussi la garnir de chevalets de papier, que l'on voit entrer en danse aussitôt qu'elle résonne.

Une cloche de verre qu'on ébranle au moyen d'un archet ou d'un marteau de bois, communique des soubresauts très vifs à une petite bille d'ivoire que l'on en approche avec précaution, suspendue à un fil ; chaque

fois qu'elle vient à toucher la cloche, la bille est lancée au loin, et en retombant elle semble s'acharner sur le verre à coups précipités. Si on touche le bord de la cloche avec la pointe d'un crayon, on l'entend crisser contre le verre qui vibre. En frottant avec le pouce et l'index enduits de colophane, dans le sens de sa longueur, une tige d'acier horizontale, on lui fait rendre un son très aigu ; si alors on approche le petit pendule de l'une des deux extrémités, la bille est encore repoussée avec une très grande violence. Une verge de laiton de $1^m,4$ de longueur et de $0^m,035$ d'épaisseur s'allonge en vibrant de $0^{mm},6$; il faudrait la charger de 3700 kilogrammes pour obtenir le même résultat par traction.

Une plaque de cuivre, de verre ou de bois, que l'on fait vibrer au moyen d'un archet, rend des sons différents, selon le point où on l'attaque ; si alors on la poudroie de sable, on le voit sauter et finalement se rassembler en courbes régulières qui marquent les lignes de repos. On peut aussi rendre visibles les oscillations d'une plaque de verre en n'éclairant qu'une série de points isolés de la surface vibrante par une lumière que l'on place derrière un écran percé de petits trous. Si l'on introduit dans un tuyau d'orgue, pendant qu'il parle, une petite membrane tendue sur un cadre de carton, suspendue à trois fils et couverte d'une poudre bien sèche, cette poudre est projetée au loin et la membrane balayée. Pour mieux constater ce résultat, on fait construire des tuyaux vitrés (fig. 49).

Il est toujours facile d'obtenir des sons par des actions mécaniques répétées à de très petits intervalles. Une carte flexible que l'on appuie sur le contour d'une roue dentée en mouvement, et qui se plie ou se relève quand une dent la rencontre ou la quitte, donne naissance à

un son d'autant plus aigu que la rotation est plus rapide : c'est le mécanisme de la crécelle. Dans la sirène, appareil que nous décrirons plus loin, un courant de gaz ou de liquide est dirigé contre un disque tournant percé de trous : il passe ou est intercepté alternativement, et ces intermittences font naître un son dans l'air ambiant. Dans les tuyaux à anche, le son est déterminé par les vibrations d'une languette élastique. Les lèvres frémissent lorsqu'on fait parler une flûte ou un cor.

Fig. 49.

Il semble quelquefois que l'on puisse produire des sons par des mouvements continus ; c'est ainsi que les tuyaux à embouchure de flûte, et le sifflet ordinaire, semblent parler sous l'influence d'un jet d'air non interrompu. Mais dans ces cas, le jet se brise contre un biseau et se partage en deux branches, l'une qui pénètre dans l'embouchure, l'autre qui s'échappe dans l'air ambiant. Le courant qui entre comprime la tranche d'air voisine du biseau ; celle-ci réagissant par son élasticité repousse le courant, puis cède de nouveau, et ainsi de suite, de sorte qu'il y a là en réalité un va-et-vient continuel. Wertheim a réussi à faire vibrer de la même manière des tuyaux plongés dans un liquide, en y injectant un courant du même liquide. Les sons qu'il

obtenait avaient le même caractère musical que lorsque les tuyaux parlaient dans l'air. Cagniard de la Tour avait déjà fait vibrer de l'eau dans des tubes de verre en frottant ces tubes dans le sens de la longueur, et l'eau était devenue sonore.

C'est ici le lieu de parler du *trembleur de Trevelyan*, instrument dans lequel le son résulte du contact de deux métaux inégalement chauffés.

Dès 1805, M. Schwartz, inspecteur d'une fonderie

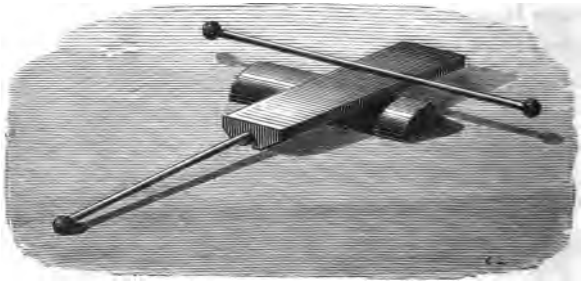


Fig. 50. Trembleur.

en Saxe, ayant posé sur une enclume froide une coupe d'argent qui était encore chaude, entendit avec stupéfaction des sons musicaux s'échapper de ces masses métalliques. Le physicien Gilbert, qui visita les travaux de la fonderie, répéta l'expérience et constata que la coupe tremblait d'une manière sensible tant que le son persistait, et qu'elle cessait de trembler lorsqu'il s'éteignait par suite du refroidissement de l'argent. Gilbert se contenta d'enregistrer ces faits, renonçant à les expliquer.

Vers 1829, M. Arthur Trevelyan, voulant étendre de la résine avec un fer à souder, s'aperçut que son

fer était encore trop chaud et l'appuya contre un bloc de plomb pour attendre qu'il eût pris la température convenable. A peine le fer touchait-il le plomb, que M. Trevelyan entendit sortir de son instrument une note aiguë, semblable, dit-il, à celle d'un galoubet de Northumberland. En même temps, il vit le fer se tourner et se retourner dans une vibration rapide.

M. Trevelyan se mit alors à étudier les faits d'une manière approfondie, et il en donna une explication

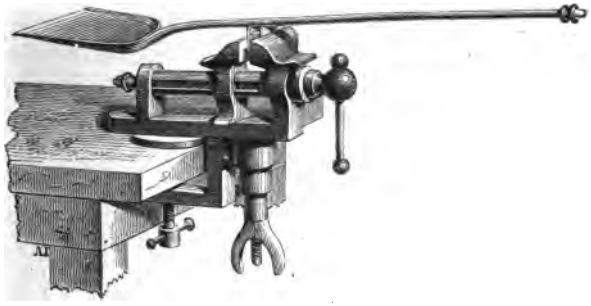


Fig. 51.

qui paraît être la vraie. Les vibrations observées sont dues à l'expansion brusque de la masse froide au contact de la masse chaude. Au moment où le fer chaud touche le plomb en un point donné, le plomb s'y boursoufle et repousse le fer; ce dernier le touche alors par quelque autre point, où le même effet se renouvelle pendant que le point qui avait été touché en premier lieu se refroidit et se dégonfle. C'est grâce à ce jeu de dilatations et de contractions alternatives que le trembleur (fig. 50) exécute sa musique. On le fait ordinairement en cuivre; c'est une barre prisma-

tique dont l'angle inférieur est évidé par une rainure, et que l'on fixe au bout d'un manche bien arrondi. On chauffe cet appareil à la température de l'eau bouillante, ou un peu au delà, et on le pose sur un morceau de plomb. On fait aussi la même expérience avec une pelle qu'on chauffe au feu et qu'on pose ensuite en équilibre sur deux lames de plomb fixées dans un étau (fig. 51); on la voit alors prendre un mouvement d'oscillation qui est accompagné d'un son plus ou moins agréable; on peut modifier le son en soutenant légèrement la pelle par le manche. Quelquefois, on réussit même à faire vibrer et chanter une simple bague ou une pièce de monnaie que l'on pose de champ sur un morceau de plomb, après l'avoir suffisamment chauffée.

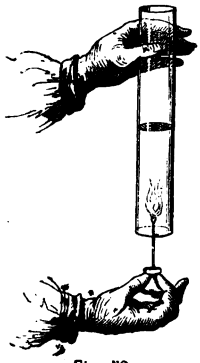


Fig. 52.

Lorsqu'un courant d'air s'échauffe et se refroidit périodiquement en un de ses points, il en résulte une suite de dilatations et de contractions alternatives qui peuvent devenir une source de vibrations sonores. C'est ce qu'on peut constater avec l'appareil de Rijke. Il se compose d'un tube de verre dans lequel est fixée (au tiers de la longueur) une petite toile métallique que l'on chauffe par une flamme d'alcool (fig. 52). Quand le fil a été porté au rouge, on retire la flamme. Au bout de quelques instants d'attente, le phénomène se manifeste : un son plaintif, sorte de vagissement timide, semble errer autour du tube ; peu à peu il s'enfle, s'accroît, devient très fort ; puis, à mesure que la toile

se refroidit, le son s'évanouit et le tube redevient muet. On s'assure facilement que le son est dû aux vibrations du courant d'air ascendant qui s'échauffe en passant par les mailles de la toile et se refroidit en la quittant ; en effet, il suffit d'incliner le tube dans une position horizontale pour faire cesser momentanément le son par l'interruption du courant.

Les sons mystérieux que la statue de Memnon rendait le matin au lever de l'aurore, et en général le craquement sonore des pierres granitiques chauffées par le soleil, doivent sans doute être comptés parmi les phénomènes de cet ordre.

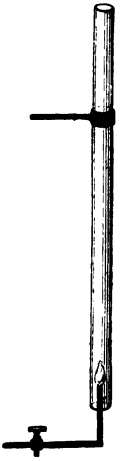


Fig. 53. Flamme chantante.

On entend quelquefois chanter une flamme de gaz quand le bec est bouché par un obstacle qui gêne l'émission du courant. Le jet, au lieu d'être continu, devient alors intermittent, et le gaz s'écoule par pulsations. Un courant d'hydrogène qui brûle dans un tube de verre peut également produire un son. Cette remarque, faite pour la première fois par Higgins en 1777, a d'abord donné naissance à un petit appareil de physique, l'*harmonica chimique*, qui a été étudié par Chladni et par Faraday. Plus tard, on a remplacé l'hydrogène par le gaz d'éclairage, et les *flammes chantantes* ont donné lieu à une foule de belles expériences, dues au comte Schaffgotsch, à M. Tyndall et à d'autres physiciens. Tout récemment, M. F. Kastner a fondé sur le même principe un instrument de musique, le *pyrophone*. Voici comment se fait l'expérience fondamentale.

On introduit dans un tube de verre (fig. 53) un bec de cuivre effilé sur lequel brûle une petite flamme de gaz. Si maintenant on donne à distance la note propre au tube de verre, l'air qu'il contient se met à vibrer, communique ses pulsations à la flamme, celle-ci s'allonge, tremble et se met à son tour à chanter toute seule. On la fait taire en appliquant le doigt sur l'orifice du tube; pour la faire résonner de nouveau, il suffit d'un autre appel de la voix; mais il faut rencontrer la note juste, sans quoi la flamme ne répond point. Avec quatre flammes et quatre tubes, on peut composer un petit buffet d'orgue qui tient l'accord parfait *do mi sol do*, aussi longtemps qu'on le veut, une fois qu'on lui a donné le ton. Quelquefois il arrive aussi que la flamme se mette à chanter spontanément, si sa pointe est placée en un point déterminé du tube.

Il est facile de s'assurer que le son des *flammes chantantes* est produit par une pulsation du gaz qui brûle dans le tube. La flamme passe alternativement du jaune au bleu suivant l'abondance plus ou moins grande du gaz qui vient alimenter la combustion. Il suffit de remuer la tête à droite et à gauche pour voir la flamme sonore se dissoudre en une série d'images bleues et blanches qui, étant reçues en différents points de la rétine, ne se confondent plus pour l'œil. On obtient le même résultat en promenant rapidement devant les yeux une lorgnette de spectacle. Le meilleur moyen de séparer les apparences successives de la flamme est cependant fourni par le miroir tournant. C'est un miroir à deux, trois ou quatre faces, auquel on donne un mouvement de rotation autour d'un axe vertical. Il fait paraître à chaque instant la flamme dans une autre direction, et il en résulte qu'elle

dessine un ruban lumineux, continu tant qu'elle reste calme, mais qui se résout en un chapelet de perles brillantes aussitôt que la flamme commence à vibrer. C'est une succession de petites étoiles, suivies de taches lumineuses d'un bleu riche comme celui des becs de gaz sur lesquels souffle le vent; les taches se terminent par des espaces complètement noirs, comme si la flamme s'éteignait momentanément pour se rallumer aussitôt après.

Fig. 54. Flammes sensibles.

On peut encore étudier les flammes sonores à l'aide d'un disque tournant, percé d'une série circulaire de trous. Un corps vibrant que l'on regarde à travers un appareil de ce genre (nommé *stroboscope*) semble ralentir ses mouvements; c'est comme si l'on avait un microscope pour grossir le temps.

Un autre phènomène du même ordre, signalé par M. Barrett, est l'espèce de sensibilité nerveuse que les flammes de gaz manifestent lorsqu'elles sont placées dans certaines conditions. Le moindre bruit semble alors les impressionner; un coup de sifflet, un mot brusque les fait plonger et trembler. Rien n'est bizarre comme ces effarements de sensitive.

Le mouvement vibratoire est un mouvement de

va-et-vient qui se reproduit à des intervalles égaux, dans un rythme uniforme. Nous en connaissons un exemple très remarquable : les oscillations du pendule. Écarté de sa position de repos, le pendule tend aussitôt à y revenir ; la pesanteur l'entraîne. Il tombe ; mais en tombant, il acquiert une certaine vitesse et il dépasse le but. On le voit remonter du côté opposé aussi haut que le point d'où il est parti. Il ne peut pas aller plus loin, car la pesanteur le tire en arrière pendant qu'il monte, et détruit ainsi peu à peu sa vitesse, qui finit par être nulle comme au moment où on l'avait lâché. Alors le pendule se trouve exactement dans les mêmes conditions qu'au premier moment ; le même jeu recommence en sens inverse, il redescend, repasse par la position d'équilibre avec la vitesse maximum, et remonte à son point de départ, où il arrive avec une vitesse nulle. Alors il a exécuté une *oscillation complète*, aller et retour, ou deux oscillations *simples* de sens contraires. Si rien ne l'arrête, il continue indéfiniment de se promener ainsi des deux côtés de la verticale, comme une sentinelle devant sa guérite ; mais la résistance de l'air, le frottement du fil au point de suspension et d'autres causes encore diminuent peu à peu l'amplitude des oscillations et ramènent finalement le pendule au repos. Toutefois, on constate que toutes les oscillations s'achèvent dans un temps constant. Un pendule long d'un mètre fait une oscillation simple en une seconde.

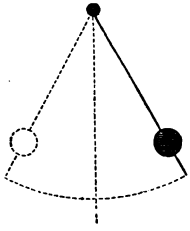


Fig. 55. Pendule.

La force qui entretient le mouvement du pendule est la gravité. Les vibrations des corps sonores sont en

général entretenues par une autre force, l'élasticité. Comme celles du pendule, elles finissent par s'éteindre sous l'action des résistances diverses qu'elles rencontrent; comme celles du pendule, elles se reproduisent après des intervalles de temps constants : elles sont *isochrones*.

Les vibrations successives d'un même son durent toutes le même temps; s'il y en a 100 par seconde, chacune dure 1/100e de seconde. Chaque son déterminé a sa durée de vibration; dans l'échelle des sons perceptibles, elle varie entre 1/30e et 1/30,000e de seconde.

Quant à la nature particulière de ces mouvements vibratoires qui donnent naissance à des sons, ils peuvent être de différentes sortes. Dans l'air, ce sont des condensations et des dilatations alternatives. Une tige prismatique peut se contracter et se dilater dans le sens de sa longueur, ou bien se ployer et se reployer transversalement, ou enfin exécuter des vibrations tournantes. Dans les liquides, les vibrations forment des ondes.

Quand le son se propage, les molécules vibrantes ne changent pas sensiblement de place, elles se bornent à osciller autour de leurs positions d'équilibre, et le mouvement seul se transmet à distance. C'est ainsi que l'eau se déplace à peine pendant qu'une onde ordinaire en parcourt la surface. Pour nous en convaincre, jetons une pierre dans une nappe d'eau tranquille. Autour du point d'ébranlement, nous verrons naître des bourrelets concentriques qui iront se propager jusqu'au rivage en décrivant des cercles de plus en plus larges. Sur leur route, ils rencontrent une foule de corps flottants : morceaux de bois, feuilles tombées, brins de paille. Ces corps, tout légers qu'ils soient, ne sont point

entraînés; on les voit se soulever à l'approche d'une onde et descendre un instant après, quand elle s'éloigne, mais ils ne changent pas de situation d'une manière perceptible. Ce n'est donc pas une onde matérielle qui est transportée à la surface de l'eau : ce qui se transmet de proche en proche, c'est la secousse et la déformation qui en résulte. Le bourrelet mobile se dissout à chaque instant et, à chaque instant, se reforme un peu plus loin avec des molécules nouvelles qui à leur tour ne tardent pas à rentrer au repos. Imaginons maintenant, au lieu d'une seule pierre qui s'enfonce, une suite de pierres qui tombent l'une après l'autre au même point, à intervalles réguliers ; les ondes qu'elles excitent iront frapper le rivage dans une succession tout aussi régulière, mais toujours sans entraîner bien loin les molécules d'eau qu'elles font monter et descendre dans un va-et-vient continuel et qui se transmettent de proche en proche l'impulsion reçue.

D'après les belles expériences des frères Ernest-Henri et Guillaume Weber, les molécules liquides décrivent ordinairement des cercles pendant qu'une onde se propage dans la masse. Supposons, pour fixer les idées, que chaque molécule fasse un tour entier dans le temps que l'onde emploie pour aller du point 0 jusqu'au point marqué 12 dans la figure 56; elle fera un douzième de

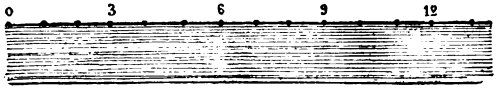


Fig. 56. Ondulations de l'eau.

tour toutes les fois que l'onde franchira un des douze intervalles compris entre les points 0 et 12.

Au moment où l'onde sera arrivée au point 3 (fig. 57), la molécule 0 aura déjà eu le temps d'accomplir 3/12 ou 1/4 de tour, la suivante 2/12 ou 1/6 de tour; la troisième, qui porte le numéro 2, aura fait 1/12 de tour, et la quatrième (3) ne fera que commencer sa

Fig. 57. Quart d'ondulation.

danse. A ce moment, la molécule 0 sera arrivée au point le plus bas de sa course et devra remonter du côté opposé.

La figure 58 représente la situation des molécules

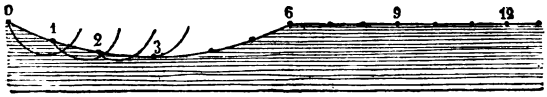


Fig. 58. Demi-ondulation.

au moment où l'onde est arrivée au point 6, la molécule 0 ayant exécuté un demi-tour, la molécule 3 un quart de tour, etc. C'est maintenant 3 qui est au point le plus bas de son orbite, pendant que 0 est remontée au niveau de la surface générale. Entre 0 et 6 est un *val*.

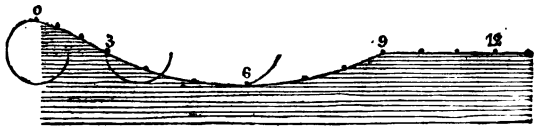


Fig. 59. Trois quarts d'ondulation.

Dans la figure 59, la première molécule a décrit les 3/4 d'une circonférence et se trouve au point culmi-

nant de sa course, la molécule 3 a fait un demi-tour et est remontée au niveau moyen, toute la file depuis 3 jusqu'à 9 forme un val d'ondulation comme précédemment la file comprise entre 0 et 6.

Enfin, dans la figure 60, le val s'est encore déplacé de trois points ; il se trouve entre 6 et 12; le point 3

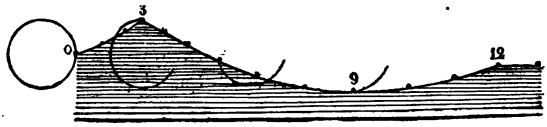


Fig. 60. Ondulation complète.

est maintenant au sommet de son orbite, pendant que le point 0, ayant décrit une circonférence entière, est revenu à sa position primitive. Entre 0 et 6, il y a une crête. L'ensemble de cette élévation et de la dépression qui s'étend de 6 à 12 forme une onde entière, et l'intervalle qu'elle remplit se nomme une *longueur d'onde*. On remarquera que dans le fond du val les molécules se sont écartées les unes des autres, tandis que, aux sommets, elles se resserrent.

Fig. 61. Ondulation de l'eau.

Les mêmes alternatives se renouvellent ensuite à intervalles de temps égaux. Quand la molécule 0 a exécuté pour la seconde fois un tour entier, la molécule 12 en a exécuté un pour la première fois ; il y a une onde complète entre 0 et 12 et une autre entre 12 et 24 (fig. 61). Quand la molécule 0 a fait trois tours, les ondes se

sont propagées jusqu'au point 36 ; lorsqu'elle a fait quatre tours, les ondes sont arrivées au point 48, et ainsi de suite. Pendant chaque oscillation complète, la tête avance d'une longueur d'onde.

La position actuelle d'une molécule dans son orbite s'appelle sa *phase*. Chaque molécule commence son ex-

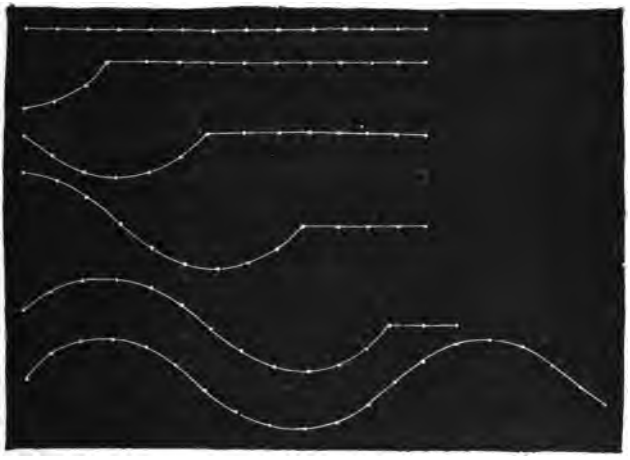


Fig. 62. Progression d'une vibration transversale.

cursion un peu plus tard que celle qui la précède immédiatement, et il en résulte qu'elle reste constamment en retard sur cette dernière pendant toute la durée du mouvement. Ce retard relatif s'appelle la *différence de phase*. Du point 0 au point 3 elle est de 1/4, de 0 à 9 de 3/4 d'une oscillation, etc. De 0 à 12 il y a une différence d'une phase entière, ce qui équivaut à une différence nulle, puisque les deux molécules occupent des positions semblables. Le mouvement se propage

comme si chaque phase du point 0 se transmettait successivement à toute la file.

Au lieu de décrire des cercles, les molécules peuvent aussi parcourir des ellipses, et ces ellipses peuvent s'allonger jusqu'à devenir des lignes droites. Les particules liquides ne font plus alors que monter et descendre dans leur verticale, elles exécutent de simples *vibrations transversales*, comme on les observe dans les cordes, dans les plaques, les membranes, etc. La forme générale de l'onde reste la même; seulement le val et le sommet deviennent symétriques : l'un est toujours l'inverse de l'autre, comme le montrent les courbes suivantes (fig. 62), qui représentent la progression d'une vibration transversale. Telles sont aussi les ondulations de l'éther qui produisent la lumière.

Si les orbites des molécules, au lieu de devenir des lignes droites verticales, se transformaient en lignes droites horizontales (la propagation de l'onde étant toujours supposée horizontale), on aurait des *vibrations longitudinales* analogues à celles des corps gazeux. Les molécules ne font alors que s'écarter et se rapprocher tour à tour, d'où il résulte des dilatations et des compressions alternatives, comme on peut le voir dans les courbes de la figure 63, qui représente la progression d'une onde longitudinale.

Dans les corps de forme cylindrique, on peut encore observer une autre classe de vibrations : les vibrations de torsion ou *vibrations tournantes*. Les molécules oscillent alors circulairement autour de l'axe du cylindre, et le mouvement se propage de la même manière que dans les autres cas. C'est comme si chaque phase du mouvement de la première molécule se transmettait à toute la file. Dans les vibrations transversales,

nous voyons le sommet de l'onde se déplacer et voyager le long de la corde (fig. 62) ; dans les vibrations longitudinales, ce sont les compressions et les dilatations qui se transmettent de proche en proche (fig. 63).

Telle est la propagation des *ondes progressives* dans un milieu indéfini. C'est de cette manière que le son est transmis dans l'air libre, que la lumière se propage dans l'éther, que les ondulations se succèdent dans une

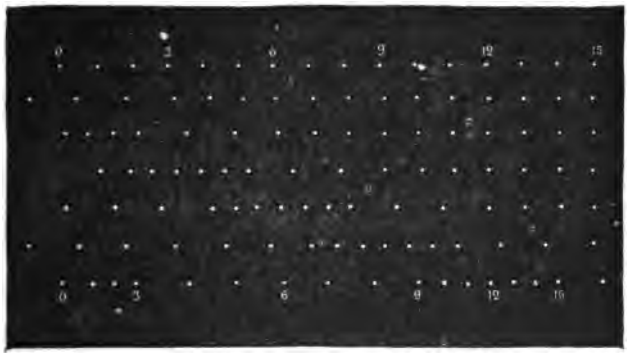


Fig. 63. Progression d'une vibration longitudinale.

nappe d'eau illimitée. On peut aussi observer ces ondes progressives dans un long tube de caoutchouc fix par un bout et dont on tient l'autre bout à la main ; un petit coup frappé à cette extrémité détermine une onde transversale qui parcourt en serpentant toute la longueur du tube et y forme les replis indiqués dans la figure 62 ; on peut la faire suivre d'une onde semblable en frappant de nouveau sur l'extrémité du tube au moment où elle rentre au repos, puis d'une troisième et d'une quatrième onde, et ainsi de suite jusqu'à ce

que la première ait atteint le mur contre lequel le tube est fixé. A partir de cet instant, le phénomène change d'aspect : les ondes ne pouvant plus avancer sont obligées de revenir en arrière, et les premières qui reviennent se croisent avec les dernières qui arrivent. Il en résulte ce qu'on appelle des *ondes fixes*.

Les ondes fixes caractérisent les vibrations sonores des corps élastiques, soit qu'ils rendent les sons qui leur sont propres, soit qu'ils résonnent seulement sous l'influence de chocs périodiques. Voici comment ces ondes se distinguent des ondes progressives. Tandis que, dans celles-ci, les molécules entrent en vibration l'une après l'autre, dans les ondes fixes elles vibrent toutes à la fois et passent ensemble par les positions d'équilibre. Ces ondes ne voyagent pas : elles naissent, meurent et ressuscitent toujours sur place.

Cette transformation est due à l'intervention d'ondes réfléchies. Les lois qui président à ces phénomènes sont assez compliquées ; pour nous en faire une idée, considérons ce qui se passe lors du choc de deux masses élastiques. Soient A, B deux billes d'ivoire suspendues à deux fils parallèles ; soulevons la bille A et laissons-la retomber contre la bille B. Si les masses sont égales (fig. 64, I), A restera en repos après le choc, cédera toute sa vitesse à B, et B sera lancée en avant. Si la bille A est plus grosse que B (fig. 64, II), elle dépassera la verticale avec une vitesse un peu amoindrie, en chassant la petite bille devant elle. Enfin, si A est plus petite que B (fig. 64, III), elle reviendra en arrière avec une vitesse plus ou moins considérable. Plus la résistance opposée par la masse B est grande, plus la réflexion est énergique.

Les choses se passent d'une manière analogue lors-

qu'une vibration se propage dans un milieu élastique. Les billes A, B de la figure I représentent deux molécules voisines qui se transmettent une onde progressive ; B reçoit toute la vitesse de A, et A rentre au repos jusqu'à ce qu'une nouvelle impulsion vienne l'ébranler. Mais si A et B se trouvent aux confins de deux milieux de densités différentes, nous tombons dans l'un des deux cas représentés par les figures II et III. Si, par exemple, le milieu B est moins résistant que le milieu A, la molécule A *glissera* en avant,

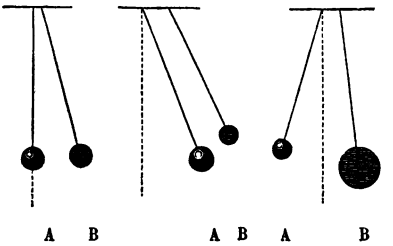


Fig. 64. Choc des billes élastiques.

tout en communiquant à B une vitesse dirigée dans le même sens (fig. II). Si, au contraire, le second milieu est plus résistant que le premier ; si, par exemple, B représente un obstacle fixe, la molécule A reviendra en arrière, et B sera à peine ébranlé.

Or qu'adviendra-t-il dans ces deux cas ? La molécule A, n'étant pas rentrée au repos, deviendra une source de mouvement pour toute la file de molécules situées derrière elle. Il en résultera une onde réfléchie qui transportera en arrière le mouvement conservé en A, lequel sera, ou bien de même sens que celui dont A était animée avant le choc (fig. II), ou bien de sens contraire (fig. III).

Ces comparaisons serviront au moins à donner une idée approximative des phénomènes qui accompagnent la réflexion d'une onde sonore. Le premier cas, celui de la figure II, représente la réflexion d'un son à l'intérieur d'un corps solide qui vibre dans l'air, A étant un point d'une surface libre et B une molécule d'air. Une réflexion de même nature a lieu à l'extrémité d'un tuyau plein d'air qui s'ouvre dans l'atmosphère, car l'air ambiant, pouvant se dilater librement, représente un milieu moins résistant que l'air intérieur. Le son qui sort de la bouche d'un tuyau ouvert se réfléchit donc partiellement sur l'air extérieur et rentre dans le tuyau. Ce résultat, indiqué par la théorie, peut se vérifier par l'expérience : à l'extrémité d'un tuyau ouvert très long, il se forme un écho très perceptible. Biot a observé que les sons lui revenaient jusqu'à six fois lorsqu'il parlait à l'une des extrémités du conduit de fonte de 931 mètres qui forme l'aqueduc d'Arcueil.

Le cas de la figure III est celui de la réflexion ordinaire sur les obstacles fixes, où la phase *change de signe*. C'est de cette manière que le son se réfléchit à l'intérieur d'un tuyau fermé, aux extrémités d'une corde fixée par ses deux bouts, etc.

Une construction facile, mais qui nous mènerait trop loin, montre que dans les deux cas les ondes directes et les ondes réfléchies se combinent de manière à produire des *ondes fixes*, séparées par des points de repos qu'on appelle des *nœuds*.

Les molécules comprises entre deux nœuds consécutifs forment ce qu'on nomme une *onde simple*[1] ; ani-

1. L'onde *simple* équivaut à la moitié d'une onde *complète* ou *double*, comme la *vibration simple* est la moitié d'une *vibration complète* ou *vibration double*.

mées d'un mouvement commun, elles s'élancent toutes ensemble dans un sens, pour revenir ensemble en sens contraire. Le centre de chaque onde est le siège d'un *ventre de vibration*. C'est là que l'agitation est à son maximum ; du ventre aux nœuds elle diminue, l'amplitude des excursions décroît, et tout mouvement s'éteint dans les nœuds.

Les molécules de deux ondes contiguës vibrent toujours en sens opposés : si elles montent d'une part, de

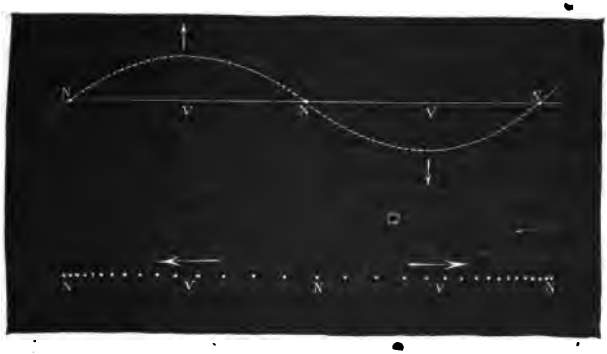


Fig. 65. Nœuds et ventres.

l'autre elles descendent, et *vice versa* (fig. 65) ; si, d'un côté, elles s'éloignent ou se rapprochent du nœud qui sépare les deux ondes, elles s'en éloignent ou s'en rapprochent également de l'autre côté.

L'intervalle de deux nœuds ou de deux ventres consécutifs est une *longueur d'onde* simple ; le double représente ce qu'on appelle une longueur d'onde entière. Ajoutons que la longueur d'une onde fixe est égale à celle d'une onde progressive ; c'est la quantité dont celle-ci avance pendant le temps que dure une

vibration; en d'autres termes, c'est l'espace que le son parcourt pendant ce temps [1]. Ainsi, lorsqu'une vibration dure un millième de seconde, la longueur d'onde correspondante est de 33 centimètres si le son se propage dans l'air, de 143 centimètres dans l'eau, etc., puisque ces nombres représentent les espaces qu'il parcourt dans ces différents milieux pendant un millième de seconde.

Dans la réflexion par un obstacle fixe, il se forme un nœud contre cet obstacle même, puisque le choc direct et le choc réfléchi, étant de sens contraires, se détruisent toujours. On rencontre donc des nœuds dans les points par lesquels un corps sonore est soutenu : aux extrémités d'une corde tendue, aux points ou une plaque est pincée par les mâchoires d'un étau, etc. La disposition des autres nœuds dépend de la forme du corps sonore et du son qu'il rend ou qui s'y propage.

Un corps élastique quelconque peut en général transmettre tous les sons qui le frappent ; mais la résonance est loin d'avoir toujours la même intensité. Elle n'est forte que lorsque les nœuds des ondes fixes qui résultent des réflexions intérieures du son affectent certaines dispositions régulières ; et dans ce cas, elle persiste encore quand la cause extérieure qui la produisait a déjà cessé d'agir. Les sons qui développent dans un corps cette résonance exceptionnelle sont précisément ceux qu'il rend lorsqu'il est ébranlé par un choc mécanique ; en d'autres termes, ce sont les sons propres

1. Une longueur d'onde simple correspond à une vibration simple comme une longueur d'onde double (ou entière) correspond à une vibration double (ou complète). On emploie tantôt l'une, tantôt l'autre de ces quantités ; il s'agit seulement de ne pas les confondre. La longueur d'onde simple peut varier depuis 5^{mm} jusqu'à 10^{m}.

à ce corps. Tout autre son n'y rencontre qu'un écho affaibli.

Considérons les vibrations fixes de quelques corps sonores, et cherchons la disposition des nœuds qui caractérisent leurs sons spécifiques ; prenons d'abord une corde tendue par ses deux bouts. Dans ce cas, il y a un nœud à chaque extrémité, puisque les extrémités sont immobiles ; en outre, il pourra y avoir un nombre quelconque de nœuds échelonnés d'un bout à l'autre de la corde. Si elle vibre transversalement à toute portée (fig. 66), tous ses points décriront simultanément des orbites semblables, mais de dimensions différentes ; le centre de la corde décrira l'orbite la plus spacieuse. Cette orbite pourra être une ligne droite verticale ou horizontale, une ellipse, un cercle ou une autre courbe, selon le mode d'ébranlement employé pour produire les vibrations. Si c'est une ligne droite, la corde vibre dans un plan ; si c'est un cercle, elle semble former un fuseau conique.

Fig. 66.

Pour la faire vibrer avec trois nœuds, on n'a qu'à toucher légèrement avec le doigt le milieu C (fig. 67),

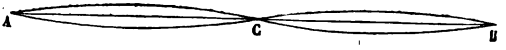


Fig. 67.

en attaquant avec l'archet l'une des deux moitiés ; la corde se divise alors en deux concamérations, séparées n C par un nœud, et qui vibrent en sens contraires.

En posant les doigts convenablement, on obtient de même trois, quatre, cinq,... concamérations (fig. 68), et à chaque mode de division correspond un autre son de la corde. On peut constater l'immobilité des points de partage en y plaçant des chevrons de papier ; on les voit rester parfaitement tranquilles tant qu'ils sont sur un nœud ; en tout autre point ils sont désarçonnés.

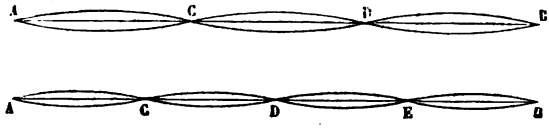


Fig. 68.

En frottant la corde dans le sens de sa longueur avec les doigts enduits de colophane, on y détermine des vibrations longitudinales, qui consistent en dilatations et contractions alternatives. Lorsqu'il n'y a que deux nœuds, aux extrémités A, B (fig. 69), la moitié AC se

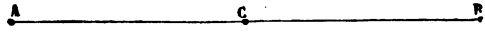


Fig. 69.

dilate pendant que BC se contracte, et *vice versa ;* le milieu C devient un ventre de vibration où le mouvement de translation est à son maximum, mais où la densité ne change pas : dans les nœuds A, B, au contraire, la densité change le plus, et le mouvement est nul. Il ne saurait en être autrement, car si la tranche C se déplace plus que toutes les autres, elle talonne celles qui sont en avant et les force à se comprimer ; en même temps elle distance celles qui sont en arrière, et celles-ci, pour la suivre, s'écartent de plus en plus.

Maintenant, la corde pourra encore se subdiviser en

concamérations d'égale longueur, séparées par des nœuds (fig. 70), qui deviendront les centres de compressions et de dilatations successives. Des deux côtés d'un même nœud, les mouvements des molécules sont toujours dirigés en sens contraires ; il y a compression quand le nœud devient le point de concours de deux files qui se rapprochent, dilatation lorsqu'il est le point de départ de deux files qui s'écartent.

Il doit arriver assez souvent qu'une corde soit agitée à la fois par des vibrations longitudinales et par des vibrations transversales plus ou moins compliquées, aux-

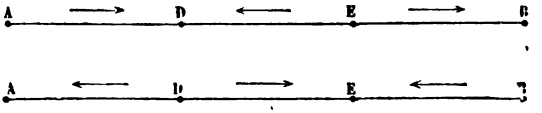


Fig. 70.

quelles pourraient encore s'ajouter des vibrations de torsion ou tournantes[1]. Chaque molécule décrit alors une orbite en forme de spirale bizarrement contournée. Si on se figure une pauvre corde de violon, houspillée par l'archet frénétique d'un virtuose qui tour à tour la caresse, la frappe, la pince, la tiraille, on ne s'étonnera pas de lui voir exécuter des courbes échevelées.

Pour faire vibrer transversalement une lame prismatique, on peut la fixer en un de ses points ou la poser horizontalement sur les tranches de deux cales triangulaires. On observe alors une série de ventres et de nœuds dont la distribution dépend de la manière dont

1. Une corde ne peut vibrer transversalement sans s'allonger un peu, et cet allongement doit occasionner des vibrations longitudinales. Le son longitudinal est quelquefois très reconnaissable dans le *la* du violoncelle ; c'est le son que les musiciens appellent un *canard*.

la verge est soutenue. Une règle générale, c'est qu'il y a toujours des ventres aux extrémités libres, et des nœuds aux points qui ont été fixés. Les nœuds se montrent sous la forme de lignes droites qui traversent la pièce dans toute sa largeur, et qu'on rend visibles en jetant du sable sur la verge pendant qu'elle vibre : les grains de sable, repoussés par les ventres, viennent se réfugier dans les nœuds, et s'y groupent en fines lignes droites, les lignes de repos ou *nodales* (fig. 71).

Fig. 71.

Les fourchettes d'acier qu'on appelle diapasons appartiennent à la catégorie des lames prismatiques ; elles vibrent de telle sorte qu'il y ait deux ventres aux extrémités des branches, qui se rapprochent et s'écartent alternativement, deux nœuds tout près de la base (fig. 72), et un troisième ventre au milieu, au fond même de la fourchette. Ce ventre du fond fait monter et descendre la tige, de sorte que, si on l'appuie sur une planchette de bois, elle fait résonner celle-ci par des chocs incessants.

Fig. 72.

Les vibrations longitudinales des tiges cylindriques ou prismatiques développent une force extraordinaire. Nous avons déjà dit qu'une grosse tige de laiton s'allongeait en vibrant d'une quantité qu'on n'aurait obtenue par traction qu'à l'aide d'une charge de plus de 3000 kilogrammes. Cela montre que, pendant ses vi-

brations longitudinales, un fil de fer est soumis à des tractions formidables qui peuvent devenir assez fortes pour le rompre. Aussi, lorsqu'un poids est trop faible pour briser un fil métallique ou même pour y déterminer un allongement permanent, on obtient souvent l'un ou l'autre de ces résultats en faisant vibrer le fil dans le sens de sa longueur pendant qu'il porte le poids en question. C'est pour cette raison qu'il faut toujours éviter de faire osciller régulièrement les chaînes des ponts suspendus. En Amérique, et en d'autres pays où l'on a construit de grands ponts suspendus pour les chemins de fer, on défend d'y laisser passer des compagnies de soldats ou des troupeaux de bêtes qui marchent en cadence, parce que l'on craint que les chaînes ne se mettent à vibrer.

Fig. 73.

Pour faire vibrer transversalement une plaque de métal, de bois ou de verre, on l'ébranle par un archet sur un point de son contour. Le moyen le plus simple de la maintenir horizontale pendant cette opération consiste à la prendre entre le pouce et l'index si elle est assez petite pour cela, ou à la faire reposer sur trois doigts si elle est grande. Le procédé le plus commode est cependant de fixer, à l'aide de quatre vis de pression garnies de liège (fig. 73), quatre points par lesquels on veut faire passer des nodales. On ébranle la plaque avec l'archet, que l'on promène verticalement sur le bord.

Si, avant ou pendant qu'on les ébranle, on saupoudre les plaques de sable fin, on voit les grains de sable d'abord sautiller tumultueusement, puis enfin venir se ranger en figures régulières et symétriques. Ce sont les lignes *nodales* de la plaque ; elles marquent les

endroits où les vibrations sont nulles, où il y a repos. Chaque nodale sépare deux concamérations où les mouvements ont des directions opposées ; si la surface se

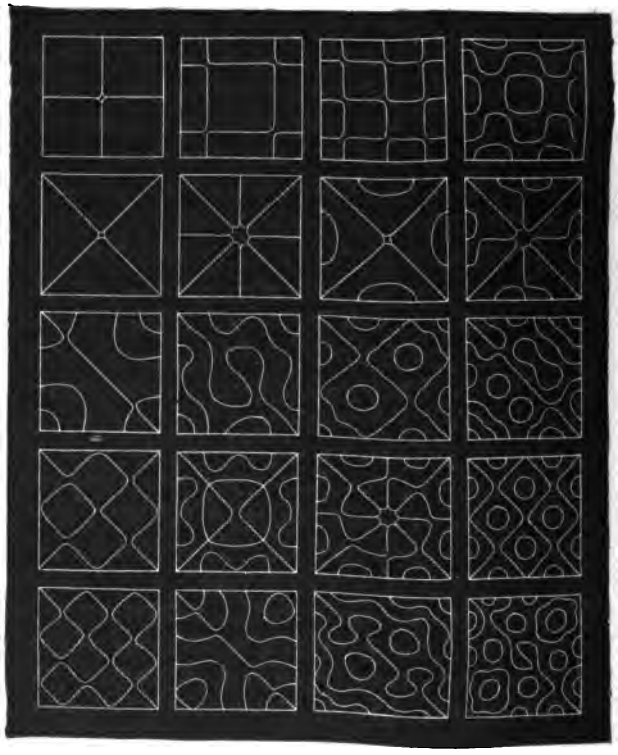


Fig. 74. Figures de Chladni.

gonfle dans l'une, elle se creuse dans l'autre, et *vice versa*. Les figures 74-75 représentent quelques-unes des nodales qui s'observent sur des plaques carrées, circulaires, triangulaires, polygonales, etc.

Ces charmants phénomènes furent découverts et publiés vers 1787 par Ernest-Florens-Frédéric Chladni, docteur en droit et en philosophie, qui passa la plus grande partie de sa vie à donner des représentations d'acoustique dans les villes d'Allemagne, de France et d'Italie, où le conduisait son humeur vagabonde. C'est

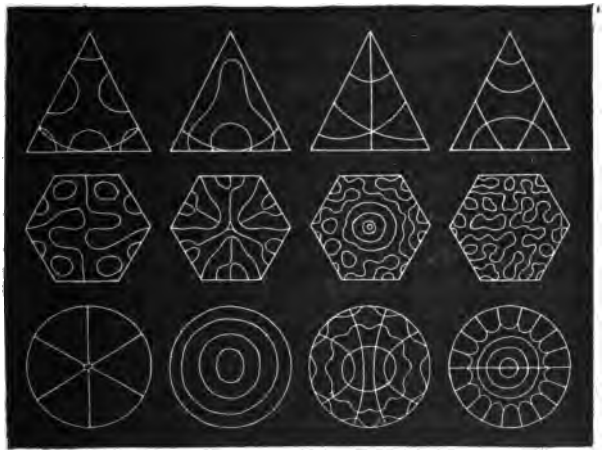


Fig. 75. Figures de Chladni.

à lui aussi qu'on doit le premier catalogue d'aérolithes et l'affirmation précoce de leur origine extra-terrestre.

Les *figures de Chladni* ont été étudiées par Savart, Faraday, Wheatstone et d'autres physiciens. En remplaçant le sable par de la poudre de tournesol et en appliquant sur les figures qui prennent naissance une feuille de papier humecté, on peut les imprimer en rouge et en conserver les dessins capricieux.

Les timbres, cloches, verres, etc., vibrent avec des nodales qui divisent la surface comme des coutures. On

les constate en versant dans l'intérieur de la cloche ou du verre un liquide qui est projeté vis-à-vis des ventres et reste immobile au contact des nœuds. On peut aussi découvrir les nœuds en approchant de la surface vibrante un petit pendule, c'est-à-dire une bille suspendue à un fil; quand la bille reste en repos, on est sur un nœud.

Les membranes formées par des peaux que l'on tend sur un tambour, ou par des feuilles de papier ou de collodion collées sur des cadres, se divisent en concamérations comme les plaques, et l'on peut observer leurs nodales en les saupoudrant de sable fin et très sec.

Grâce à sa flexibilité, une membrane un peu mince résonne d'ailleurs facilement sous l'impression d'un son quelconque. Le tympan de l'oreille nous en offre un exemple frappant. Dès lors, pour découvrir l'emplacement des nœuds et des ventres dans une colonne d'air qui vibre, on peut se servir de l'oreille ou bien d'un petit tambour couvert de sable.

Nous avons déjà dit que les vibrations de l'air sont des vibrations *longitudinales*. Dans les ventres il y a agitation, sans changement de densité; dans les nœuds, calme complet, avec des alternatives de compression et de dilatation. La trépidation de l'air dans les ventres se communique à une membrane si elle est frappée perpendiculairement; les compressions et dilatations qui ont lieu dans les nœuds la font vibrer si elles n'agissent que d'un seul côté. L'oreille est surtout sensible aux changements de densité des nœuds.

Les *flammes de Kœnig*, dont nous parlerons plus loin, permettent d'utiliser cette propriété des membranes pour rendre visibles les changements de densité de l'air. Ce sont des flammes nourries par un courant de

gaz qui palpite sous la pression périodique d'une membrane insérée dans la paroi du conduit. Observées dans un miroir tournant, elles offrent l'aspect d'une série de languettes séparées par des espaces noirs dont

Fig. 76. Chladni.

la distribution dépend de la nature des vibrations sonores (fig. 77).

Dans ces derniers temps, M. Kundt a réussi à rendre visibles les vibrations d'une colonne d'air dans un tube de verre, en y introduisant des poussières qui se rassemblent pour former des dessins réguliers lorsqu'on fait parler le tube. M. Kundt a pu, par ce moyen, mesurer la longueur d'onde d'une note donnée dans l'air et dans d'autres gaz. Il a fait des expériences analogues avec des plaques d'air, enfermées entre deux disques de verre.

Un admirable moyen d'étudier les vibrations des corps sonores nous est fourni par la méthode graphique ou *phonographie*, dont la première idée vient de Thomas Young[1].

Supposons qu'un pendule terminé par une pointe fasse des oscillations assez peu étendues pour que sa pointe ne quitte jamais une feuille de papier horizontale, couverte de noir de fumée. Il est évident que la pointe creusera dans la poussière noire un sillon blanc

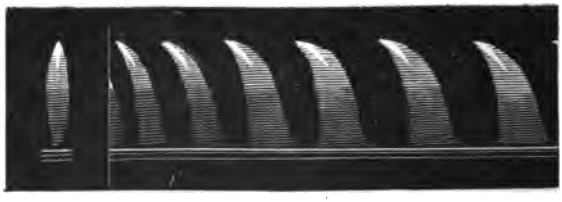


Fig. 77. Flammes de Kœnig.

qu'elle parcourra alternativement de droite à gauche et de gauche à droite. Mais si l'on tire la feuille d'avant en arrière, à chaque instant la pointe rencontrera le papier à la hauteur d'un autre sillon parallèle au premier, et au lieu d'une ligne droite, elle y tracera une courbe sinueuse à replis serpentants.

Il en sera de même si, à la place du pendule, on substitue une tige vibrante devant laquelle on fait glisser une plaque de verre noirci. Si la tige est armée d'une pointe fine et flexible, elle tracera sur le verre une série de zigzags dont chacun représentera une vibration.

Au lieu d'une plaque que l'on fait glisser entre deux coulisses, il est plus commode d'employer un cylindre

1. *Lectures on natur. Phil.* Londres, 1807. t. I, p. 190.

tournant (fig. 78), sur lequel on colle une feuille de papier noircie à la flamme d'une lampe. Quand le tracé est fait, on décolle le papier et on le trempe dans un bain d'alcool ; le noir de fumée se fixe alors, et l'épreuve peut se conserver indéfiniment.

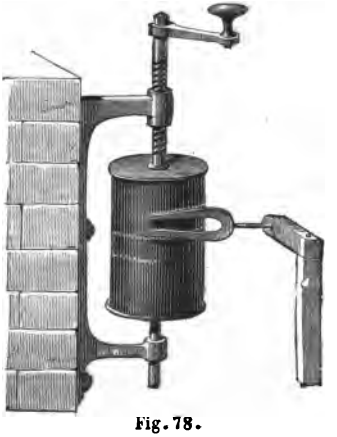


Fig. 78.

Pour mettre un diapason en état d'écrire ses vibrations, on plante sur l'une des branches, avec un peu de cire rouge, une pointe de cuivre ou un fragment de tuyau de plume. Pour obtenir le tracé des vibrations d'une membrane, il faut également

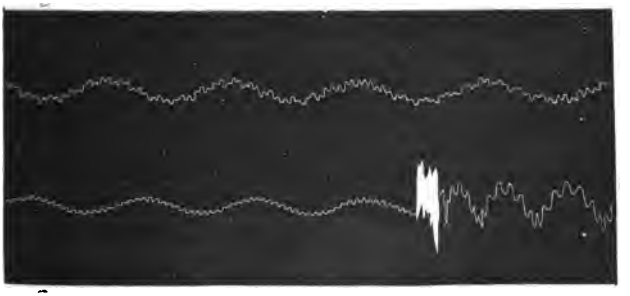


Fig. 79. Phonogrammes.

commencer par l'armer d'une pointe quelconque : ce sera une barbe de plume, un crin, une soie de porc, un fragment de clinquant, que l'on fixera debout sur

la membrane avec une goutte de cire. On observe la direction dans laquelle vibre le style, et on l'approche du cylindre de manière que les oscillations soient parallèles à l'axe de celui-ci. Quand la membrane est en repos, si on fait tourner le rouleau, la pointe y décrit une hélice régulière et très fine ; mais dès que la membrane vibre, l'hélice est tremblée, et chaque sinuosité correspond

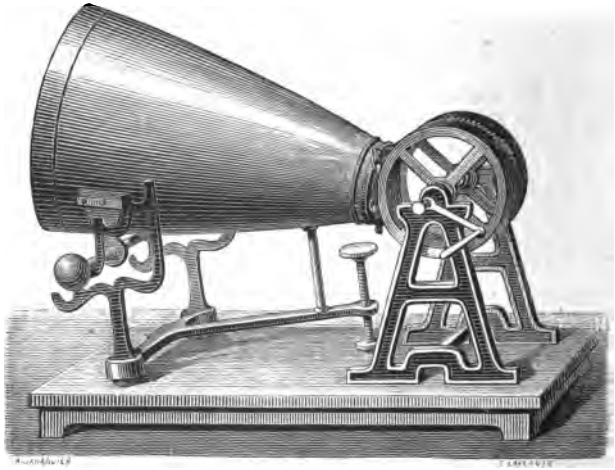


Fig. 80. Phonautographe.

à une oscillation du corps sonore. La figure 79 représente diverses courbes obtenues par un de ces moyens.

M. Léon Scott a eu l'idée ingénieuse de se servir d'une membrane, disposée comme il vient d'être dit, pour se procurer un tracé visible des vibrations de la voix ou d'un autre son quelconque transmis par l'air. C'est là le principe de l'instrument que M. Kœnig a beaucoup perfectionné, et qu'il construit sous le nom de *phonautographe* (fig. 80). Une membrane, munie

d'un style flexible, est tendue au bout d'une espèce de grand cornet acoustique, de forme paraboloïde ; elle résonne fortement lorsqu'on chante ou que l'on fait parler un tuyau d'orgue à l'autre extrémité de l'appareil, et la pointe qu'elle porte écrit ses vibrations sur un rouleau qui avance en tournant[1]. M. Kœnig est par-

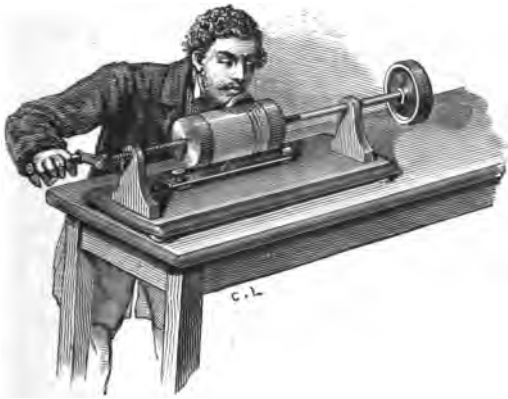


Fig. 81. Phonographe.

venu à écrire de cette façon un air de musique composé de sept notes.

Mais le phonographe, inventé par M. Edison, il y a trois ans, a réalisé une conception bien plus hardie : il a permis de fixer et de reproduire la parole. La membrane du phonautographe est ici remplacée par une mince plaque de métal, munie d'une pointe qui grave son tracé dans une feuille d'étain. On obtient ainsi un gaufrage qui représente la trace matérielle de la phrase

1. En adaptant une embouchure au tuyau du stéthoscope de Kœnig, on a un petit appareil qui peut remplacer le paraboloïde du phonautographe.

prononcée pendant qu'on faisait tourner la manivelle de l'appareil (fig. 81). Si ensuite on replace la pointe à l'endroit où commence la phrase enregistrée et qu'on fasse de nouveau marcher le cylindre, la pointe, guidée par les rainures qu'elle a creusées elle-même, entre en vibration et fait à son tour vibrer la plaque. On entend sortir du phonographe une voix, — un peu grêle à la vérité, — mais qui reproduit cependant avec

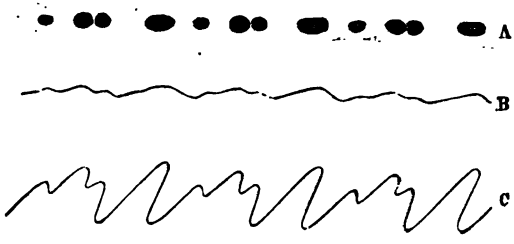


Fig. 82.

assez de netteté les paroles qu'on avait confiées à l'instrument[1].

La fig. 82 représente, d'après M. Alfred Mayer, A, le dessin pointillé produit sur la feuille d'étain par la syllabe *bat*; B, le profil du gaufrage, reproduit par un levier sur une lame de verre noirci; C, les contours des flammes de Kœnig correspondant au même son. On peut remarquer l'analogie des dessins A et C.

1. On trouvera plus de détails sur cette invention dans le livre de M. du Moncel, qui fait partie de la *Bibl. des Merveilles*.

IX

HAUTEUR DES SONS

Mesure des notes. — Chladni, Mersenne, Pythagore. — Sonomètre. — Roue dentée de Savart. — Sirènes. — Limites des sons perceptibles. — Étendue de l'échelle des sons musicaux. — Limites de la voix humaine.

Nous avons vu que l'origine du son doit être cherchée dans les vibrations des corps élastiques. Ces vibrations sont essentiellement *isochrones*, c'est-à-dire que la même phase revient toujours au bout du même intervalle et que chaque oscillation dure exactement le même temps que celle qui l'a précédée. Il nous sera maintenant facile de définir la *hauteur* des sons, ou ce qui distingue un son grave d'un son aigu : c'est la durée de leurs vibrations ou le nombre des vibrations qu'ils accomplissent dans l'unité de temps.

Les sons de même hauteur, quels que soient les corps sonores qui les donnent, correspondent à des nombres de vibrations égaux. Deux notes produites avec deux instruments différents, pourvu qu'elles offrent les même nombres de vibrations, sont toujours à l'unisson. Lorsqu'une note nous paraît plus aiguë, plus élevée

qu'une autre, c'est qu'elle résulte de vibrations plus rapides.

Pour apprécier d'une manière exacte la hauteur d'un son, il faut donc mesurer le nombre des vibrations qu'il exécute en une seconde. Un des moyens les plus simples d'y parvenir nous est fourni par la méthode graphique. On ébranle le corps sonore et on lui donne de quoi écrire : une pointe et un cylindre tournant couvert de papier noirci. A côté on dispose un chronomètre pointeur, qui à chaque seconde fait une marque sur le même cylindre. On compte ensuite le nombre de zigzags compris entre deux marques, et on a la hauteur de la note observée. Si on possède un diapason dont le nombre de vibrations soit exactement connu, on peut le mettre à la place du chronomètre; il écrira à côté du corps sonore dont on veut compter les vibrations, et chaque sinuosité de son tracé représentera une fraction de seconde déterminée. Supposons, par exemple, que le diapason fasse régulièrement 100 vibrations par seconde, et qu'à côté de 50 de ses oscillations on en trouve 220 dans le tracé parallèle : on en conclura que le corps qui a donné ce tracé exécute 440 vibrations dans le temps que le diapason met à en accomplir 100, c'est-à-dire dans une seconde.

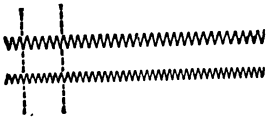


Fig. 83.

Chladni avait trouvé un moyen ingénieux, mais malheureusement peu exact, de se procurer des corps sonores à nombres de vibrations connus, en partant d'oscillations assez lentes pour agir sur l'oreille. Il choisissait une règle métallique assez longue et assez mince pour qu'elle ne fît que quatre oscillations par seconde,

qu'il était facile de compter montre en main. D'après la théorie, une règle d'une longueur moitié moindre devait alors donner 16 vibrations, une règle quatre fois plus courte 64, et ainsi de suite. En raccourcissant toujours la règle dans des proportions déterminées, on entrait dans le domaine des vibrations sonores. Mais ce procédé n'est bon qu'en théorie; dans la pratique il expose à de grandes erreurs.

Le P. Mersenne mesurait la hauteur des notes par la

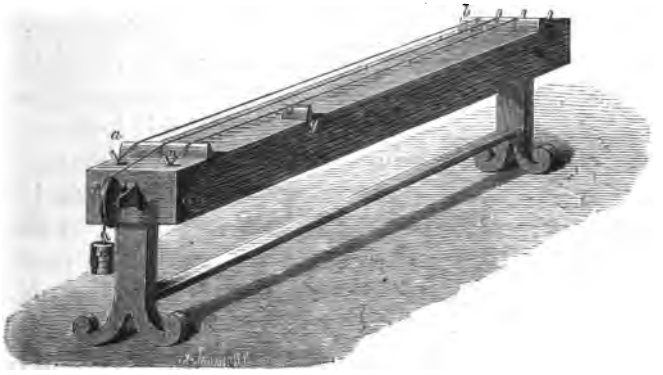


Fig. 84. Le sonomètre.

longueur de corde qu'il fallait employer pour les produire. Il avait reconnu que, lorsqu'on fait vibrer deux cordes de longueur différente, mais identiques pour tout le reste et également tendues, les nombres de leurs vibrations sont toujours en raison inverse de leur longueur. Une corde de 15 pieds, tendue par un poids de 7 livres, lui donna 10 vibrations par seconde; ces vibrations étaient trop lentes pour être entendues, mais en raccourcissant la corde au vingtième de sa longueur, Mersenne obtenait un son vingt fois plus aigu, ou de 200

vibrations par seconde, qu'il prit pour point de départ de ses mesures.

C'est sur le même principe que repose l'emploi du *sonomètre* (fig. 84), instrument très utile pour déterminer approximativement la hauteur d'une note. C'est une caisse rectangulaire de sapin dont la table porte deux chevalets fixes *a*, *b*, sur lesquels on tend une ou plusieurs cordes de laiton filé. Par un bout, ces cordes sont nouées à des goupilles fixes ; par l'autre, elles s'enroulent sur des chevilles que l'on fait tourner plus ou moins, ou bien elles passent sur la gorge d'une poulie et on les charge d'un poids. Entre les chevalets fixes, il y a une règle divisée sur laquelle glisse un chevalet mobile *g ;* on s'en sert pour réduire la longueur de la première corde jusqu'à ce qu'elle soit à l'unisson de la note à déterminer ; à ce moment, on lit sur la règle la fraction de corde où l'on s'est arrêté, et un calcul fort simple donne la note qui correspond à cette fraction, pourvu que l'on connaisse la note de la corde entière. Or, celle-ci se détermine par comparaison avec un diapason, et nous verrons plus tard comment se fixe la note du diapason.

On constate avec le sonomètre que la moitié d'une corde donne l'octave aiguë de la note que rend la corde entière ; que, si on la réduit aux deux tiers de sa longueur, le son monte à la quinte ; qu'en prenant les trois quarts de la corde, on obtient la quarte, etc. Si la corde entière donne l'*ut*, ses trois quarts donneront le *fa*, les deux tiers le *sol*, la moitié l'octave de l'*ut*, et ainsi de suite. Ces relations entre les longueurs des cordes et les notes de la gamme n'étaient point ignorées des pythagoriciens, mais nous pouvons les interpréter aujourd'hui en disant que l'octave, la quinte, la quarte sont

des intervalles caractérisés par les rapports $\frac{2}{1}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, des nombres de vibrations.

Nous dirons qu'une note est à l'octave aiguë d'une autre si elle fait dans le même temps deux fois autant de vibrations; que deux notes sont à l'intervalle de la quinte si 3 vibrations de l'une correspondent à 2 de l'autre; qu'elles forment une quarte si l'une fait toujours 4 vibrations pendant que l'autre en faît 3, et ainsi de suite.

C'est ici le lieu de dire ce que vaut une anecdote que l'on trouve chez beaucoup d'auteurs anciens. Un jour, disent-ils, Pythagore passa devant une forge où travaillaient quatre forgerons. Il fut stupéfait de constater que les quatre marteaux qui venaient en mesure s'abattre sur l'enclume donnaient ensemble les intervalles de la quarte, de la quinte et de l'octave. Il les fit peser, et trouva que leurs poids étaient entre eux comme les nombres 1, $\frac{4}{3}$, $\frac{3}{2}$, 2. Rentré chez lui, le grand philosophe résolut de vérifier ce résultat par une nouvelle expérience. Il prit une corde et la chargea successivement de quatre poids qui reproduisaient exactement les rapports des marteaux; en vibrant sous ses quatre charges, la corde donna quatre notes qui étaient entre elles dans les intervalles de la quarte, de la quinte et de l'octave!

Malheureusement, les notes d'une corde ne varient point en raison directe de la charge; pour obtenir l'octave, par exemple, il faut quadrupler, et non doubler le poids tenseur. Avec les quatre poids des marteaux, Pythagore n'aurait donc jamais obtenu sur sa corde les intervalles musicaux en question. Ensuite, il serait bien difficile de trouver des marteaux donnant des notes proportionnelles à leur poids : ce serait une coïncidence purement fortuite. Enfin, il faut le dire, ce qu'on

entend dans une forge, c'est moins le marteau que la barre qui est sur l'enclume.

On a encore appliqué à la mesure des nombres de vibrations un autre principe qui consiste à produire des sons par une suite d'impulsions périodiques émanées d'une roue dont un compteur mécanique additionne les tours. Cette idée a été d'abord réalisée par Hooke en 1681 ; il paraît aussi que des expériences du même genre furent instituées par Stancari à Bologne.

Savart fit construire dans un dessein analogue, vers 1830, sa *roue dentée*, espèce de vaste crécelle où les sons étaient produits par les oscillations d'une carte métallique que les dents de la roue faisaient incessamment plier sous leur choc. La roue était mise en mouvement par une courroie enroulée sur un volant à manivelle (fig. 85) ; un compteur à engrenage, fixé sur l'axe de la roue, accusait le nombre de tours accomplis dans un temps donné. En le multipliant par le nombre des dents, on avait le compte des vibrations exécutées par la tranche de la carte et, par suite, la hauteur de la note qu'elle avait donnée. La difficulté de faire tourner la roue avec une vitesse uniforme et la mauvaise qualité des sons de cet appareil encombrant l'ont fait abandonner depuis longtemps.

On obtient de meilleurs résultats avec la *sirène*, appareil qui a été inventé par Cagniard de la Tour. Voici ce que c'est qu'une sirène. C'est, dans le principe, un disque percé de trous qui sont distribués en cercle autour du centre ; on fait tourner le disque et on s'arrange de manière qu'un courant d'air soit toujours dirigé contre un point du cercle troué ; le vent passe chaque fois qu'il rencontre un orifice, il est intercepté

lorsqu'il rencontre les pleins. Si le disque fait dix tours par seconde, et si les ouvertures sont au nombre de douze, le jet d'air passera cent vingt fois par seconde; ce sera aussi le nombre des vibrations du son obtenu.

Cette disposition, imaginée par Seebeck, est très utile

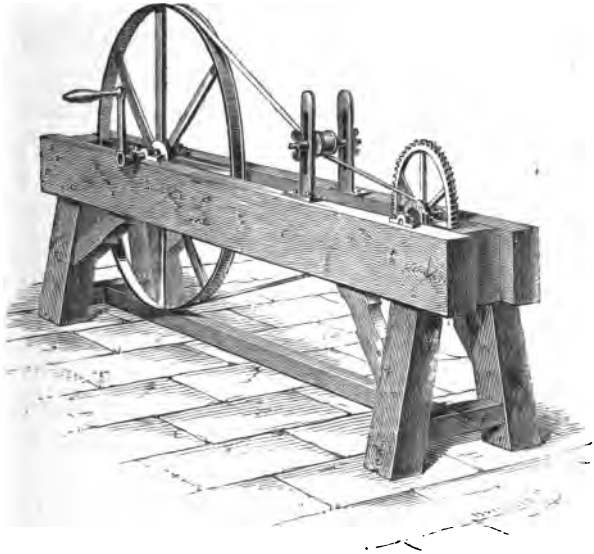


Fig. 85. Roue dentée de Savart.

pour beaucoup de recherches; elle permet par exemple de démontrer que le son ne peut être engendré que par des impulsions qui se succèdent à intervalles égaux, car il est indispensable que les trous soient également espacés sur le disque si l'on veut obtenir le son correspondant à leur nombre. Des trous irrégulièrement distribués ne donnent qu'un bruit composé de plusieurs sons plus graves.

On peut faire tourner le disque par un volant à manivelle ou par un mouvement d'horlogerie, qui compte en même temps le nombre des tours accomplis. L'instrument primitif de Cagniard de la Tour, dont l'invention date de 1819, marche par l'impulsion même du courant d'air qui produit le son. Le vent qui vient d'une soufflerie, entre d'abord par l'orifice *a* dans un tambour cylindrique dont le fond supérieur est formé par un disque troué (fig. 86). Sur ce disque il y en a un autre *b*, également troué, qui tourne sur un axe vertical *c*; le vent passe quand les orifices sont en coïncidence, il est intercepté quand ils sont croisés. Les orifices sont percés obliquement et de telle sorte qu'au moment d'une coïncidence les deux conduits en regard soient à équerre. Grâce à cette disposition, le courant qui vient d'en bas change brusquement de direction en passant de l'orifice inférieur dans l'orifice supérieur, et imprime au plateau mobile une impulsion suffisante pour le faire tourner comme un moulin à vent. Malheureusement la vitesse de rotation va toujours en croissant, et le son s'élève outre mesure si l'on maintient dans la soufflerie une pression constante. On peut, il est vrai, ralentir le mouvement en diminuant la pression, mais, quoi qu'on fasse, on parvient rarement à tirer de la sirène un son tout à fait uniforme. On cherche donc à tenir la note

Fig. 86. Sirène de Cagniard de la Tour.

aussi bien que possible dès qu'on est arrivé à l'unisson de celle qu'il s'agit de déterminer, et l'on fait alors engrener le compteur qui doit faire connaître le nombre de tours. Ce compteur, que l'on voit dans la figure à découvert, est mis en mouvement par une vis sans fin que porte l'arbre vertical *c* du plateau mobile; il a deux cadrans dont les aiguilles marquent respectivement les centaines et les dizaines et unités. Si, au bout de cinq minutes, on lisait sur le premier cadran le chiffre 66 et sur le second 30, le nombre des tours accomplis serait 6630; en supposant que le disque porte 20 trous, cela donnerait 132 600 pulsations du courant sonore en cinq minutes = 300 secondes, ou 442 par seconde. On en conclurait que la note obtenue correspond à 442 vibrations doubles.

La sirène peut chanter sous l'eau; c'est de là que lui vient son nom. Plongée dans un liquide quelconque, elle le fait résonner si on le pousse en jet puissant dans le réservoir. On peut ainsi faire chanter l'eau, l'huile, le mercure. Les sons se distinguent par un timbre particulier, mais les notes sont les mêmes que dans l'air.

Seebeck, Dove, Helmholtz, et en dernier lieu, M. Kœnig, ont beaucoup perfectionné la construction de la sirène. La grande sirène de M. Kœnig a une série de disques de rechange; elle est mise en rotation par un fort mouvement d'horlogerie.

Pour engendrer le courant d'air qui fait parler ces instruments, on se sert d'une *soufflerie*, appareil composé d'un soufflet double (fig. 87), sur lequel on agit par une pédale *p* et un bâton *t*, et d'un *sommier* ou porte-vent *c*, qui est percé d'un certain nombre d'orifices. C'est par ces orifices que la sirène ou les tuyaux

qu'on veut faire parler reçoivent le vent; on les ouvre en pressant des boutons.

Nous verrons plus loin (au chapitre X) comment les vibrations d'un diapason peuvent aussi être comptées

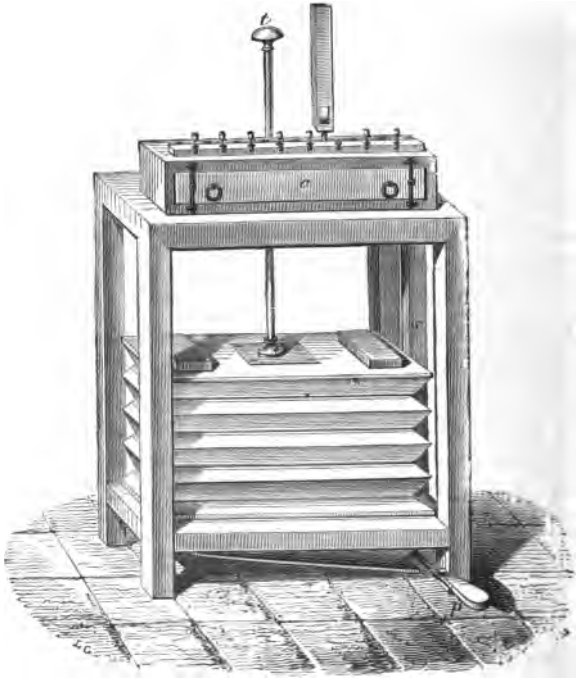


Fig. 87. Soufflerie.

directement par un mouvement d'horlogerie dont le diapason forme le régulateur.

On s'est naturellement demandé où se trouvent les limites des sons perceptibles, quelles sont les notes les plus basses et les plus élevées que l'oreille puisse encore apprécier.

Sauveur, en 1700, admettait que le son le plus grave était celui d'un tuyau de 40 pieds ouvert, qui correspond à 25 vibrations [1].

Le tuyau le plus grave que les facteurs d'orgues construisent est celui de 32 pieds (10 mètres et demi); il doit donner l'*ut*-$_2$, qui correspond à 32 vibrations simples par seconde. D'un autre côté, on construit des tuyaux très courts qui devraient donner dix mille vibrations et plus. Mais est-il prouvé que ces sons existent réellement?

Les notes les plus basses de l'octave de 16 pieds, l'*ut* de 65 et le *ré* de 73 vibrations, ne s'entendent déjà que comme une sorte de ronflement dont l'oreille la plus exercée ne reconnaît qu'à grand'peine la hauteur musicale; on ne parvient à accorder les tuyaux qui donnent ces notes qu'en ayant recours à des méthodes indirectes. Sur le piano, où elles constituent la limite inférieure du clavier, on peut également remarquer combien le caractère musical en est indécis, et dans la musique d'orchestre on ne descend jamais au-dessous du *mi* de 82 vibrations de la contre-basse. Dans ces régions, l'oreille commence déjà à percevoir les vibrations de l'air comme des chocs séparés. Cette sensation devient plus distincte à mesure qu'on s'avance dans l'octave de 32 pieds, et lorsqu'on approche de l'*ut* de 32 vibrations, on n'entend plus de son proprement dit; ce qui frappe l'oreille n'est qu'une suite d'explosions discontinues. Si néanmoins beaucoup de personnes s'imaginent avoir entendu les notes de cette octave, c'est que les tuyaux d'orgue produisent, en même temps que

1. Un tuyau de cette longueur, construit par Walcker, a figuré en 1854 à l'exposition industrielle de Munich.

leur note fondamentale, d'autres notes plus élevées dont nous parlerons dans la suite ; un tuyau de 32 pieds peut donc faire résonner faiblement des notes appartenant à une octave supérieure, et c'est ce qui fait très probablement l'illusion des auditeurs.

La même illusion s'est mêlée sans aucun doute aux conclusions que Savart a tirées de ses expériences sur la limite de perceptibilité des sons. Il faisait tourner une barre de fer autour d'un axe horizontal et la disposait de manière qu'elle passât à chaque demi-révolution à travers une fente découpée dans une planche. Au moment où la barre y entre, elle refoule l'air comme ferait un piston ; il se produit une sorte d'explosion, et si la roue tourne assez vite, on entend un son d'une extrême gravité accompagné d'un ronflement ou roulement très intense. Sept ou huit coups par seconde donnaient encore un son perceptible, et Savart crut pouvoir en conclure que la note la plus grave que l'oreille distingue encore correspond à 7 ou 8 vibrations doubles, qui équivalent à 14 ou 16 vibrations simples. Mais Despretz n'eut pas de peine à démontrer que c'était une erreur, car en disposant deux fentes au lieu d'une seule sur le trajet de la barre, on n'obtient pas de notes à l'octave, comme cela devrait être, puisqu'on a doublé le nombre des explosions. Il faut donc admettre que déjà avec 8 coups de la barre on produit la note qui correspond à 16 coups (32 vibrations), et ce résultat n'a rien d'étonnant si l'on considère que les sons naturels sont presque toujours accompagnés de notes plus élevées, appelées harmoniques, ainsi que nous le verrons bientôt. En résumé, l'appareil de Savart donne tout au plus une note d'environ 30 vibrations simples par seconde.

M. Helmholtz eut recours à un autre procédé. Il prit une caisse de bois fermée de tous les côtés et y pratiqua une petite ouverture à laquelle il adapta un tube de caoutchouc destiné à être introduit dans le conduit auditif. Sur cette caisse de résonance, il tendit une corde de laiton, lestée à son milieu par une pièce de billon trouée; grâce à cette précaution, la corde ne pouvait point donner les octaves supérieures de sa note fondamentale, qui était très basse.

Le son d'une corde qui donne une note moyenne devient, dans ces circonstances, d'une force presque intolérable; mais celle qui fut employée à ces expériences et qui était accordée pour le *ré* de 73 vibrations, ne produisit qu'un son très faible et légèrement ronflant. En descendant jusqu'au *si* de 61 vibrations, M. Helmholtz n'entendait presque plus rien. Il conclut de ces expériences que les sons perceptibles commencent à environ 60 vibrations simples par seconde, et qu'ils ne prennent un caractère musical qu'à partir d'environ 80 vibrations, dans l'octave dite de 16 pieds. Toutefois, ces limites varient peut-être d'une personne à l'autre; il n'est pas non plus impossible qu'elles dépendent de l'habitude, et de l'intensité des sons.

La limite supérieure des sons perceptibles n'est certainement pas la même pour tout le monde. Beaucoup de personnes n'entendent plus du tout certaines notes très élevées que d'autres distinguent encore parfaitement. Savart a constaté qu'un son de 31 000 vibrations simples, produit par les vibrations longitudinales d'un cylindre de verre de $0^m,16$ de longueur, était encore entendu par la plupart de ses auditeurs, tandis que les 33 000 vibrations d'un cylindre de $0^m,15$ n'étaient pas toujours perçues distinctement. Avec des

roues dentées d'un grand diamètre, il produisait un son extrêmement intense qui ne disparaissait qu'au moment où il devait y avoir 48 000 vibrations par seconde ; mais il est difficile de prouver que, dans ce cas, la carte flexible rencontre encore *toutes* les dents de la roue.

Despretz a cru reculer encore cette limite au moyen de diapasons qui donnaient jusqu'à 73 000 vibrations simples. Ce sont des miniatures de diapasons que l'on conserve encore à la Sorbonne. Mais comment en a-t-on déterminé les notes? C'est M. Marloye qui a accordé les diapasons à l'oreille. Il a d'abord construit une gamme qui va de 16 000 à 32 000 vibrations, toujours en se laissant guider par l'oreille ; puis, il a accordé de la même manière un diapason à l'octave aiguë du dernier, donnant par conséquent 64 000 vibrations et correspondant à ut_{10}, puis enfin le $ré_{10}$ de 73 000 vibrations. Or ces diapasons ne sont entendus que par les personnes qui ont l'oreille très sensible ; les notes extrêmement aiguës qu'ils rendent produisent une sensation douloureuse, un malaise indéfinissable, qui persiste encore longtemps après ; il ne peut être question d'en saisir les rapports musicaux. Jusqu'à plus ample information, nous regarderons ces déterminations comme peu sérieuses.

M. Kœnig a tout récemment repris ces expériences ; les notes les plus aiguës qu'il pût entendre correspondaient à 45 000 vibrations. Mais, comme nous l'avons déjà dit, cette limite varie pour diverses personnes. Les notes très élevées cessent d'être perceptibles pour beaucoup d'oreilles. Wollaston n'a-t-il pas constaté que bien des personnes sont incapables de distinguer la stridulation aiguë des grillons et même le pépiement des

moineaux? Il est permis de supposer que les insectes produisent et entendent encore des notes trop élevées pour l'oreille humaine.

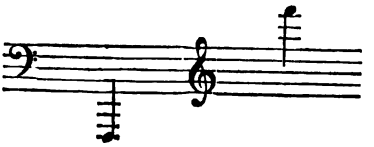
En résumé, les sons perceptibles se trouvent renfermés entre les limites d'environ 60 et de 50 000 vibrations simples par seconde, limites qui, pour des oreilles exceptionnellement sensibles, se reculent peut-être des deux côtés. Les ondulations de l'éther qui produit la chaleur et la lumière sont infiniment plus rapides. La chaleur obscure commence à 65 trillions de vibrations, les couleurs visibles sont comprises entre 400 et 900 trillions, les rayons chimiques atteignent déjà au quatrillion. Or, la chaleur n'est pas produite uniquement par les vibrations du fluide éthéré, il est certain que les corps pondérables vibrent eux-mêmes lorsqu'ils s'échauffent; il faut donc admettre que leurs molécules peuvent accomplir des oscillations d'une rapidité inouïe. Maintenant que deviennent les vibrations dont le champ s'étend depuis 40 000 jusqu'à 65 trillions, qui sont trop rapides pour être sonores et trop lentes pour se faire sentir comme chaleur? Avons-nous des sens qu'elles affectent, des organes qu'elles impressionnent? Faut-il chercher dans ces vibrations non classées l'explication de l'électricité et du galvanisme, que tout nous porte à considérer comme une forme du mouvement? Qui répondra?

Il ne sera pas sans intérêt de mentionner ici l'étendue des sons donnés par les instruments de musique les plus usités. Voici d'abord l'orgue, le plus riche de tous les instruments. Grâce à M. Cavaillé-Coll, il embrasse tout le champ des vibrations perceptibles, presque dix octaves. Le piano comprend à peu près

sept octaves qui parcourent une échelle de notes comprises entre le *la* $\_\_{}_2$ et l'*ut*$_7$, ou entre 54 et 8400 vibrations.

Les sons du violon s'étendent normalement de 400 à 6000, à travers quatre octaves, mais l'on peut tirer de cet instrument des notes beaucoup plus aiguës. La contre-basse se renferme entre 80 et 350 vibrations, mais l'octo-basse de M. Vuillaume descendait jusqu'à 64 vibrations. Les cors, trombones et autres instruments de cuivre rendent des sons très variés. La note la plus aiguë que l'on emploie dans un orchestre est probablement le *ré*$_7$ du piccolo, qui correspond à 9400 vibrations simples. On peut dire que les sons qui ont un caractère musical décidé ne dépassent guère les limites de six octaves et demie et sont renfermés entre 80 et 8000 vibrations.

Comme limites extrêmes de la voix humaine on peut prendre le *fa*-$_1$ de 87 et l'*ut*$_6$ d'environ 4200 vibrations :



Les Fischer. La Bastardella.

X

LES NOTES

Rapports des notes. — Gamme. — Dénomination des notes. — Hymne de saint Jean. — Notation musicale. — Mode majeur et mode mineur. — Gamme tempérée. — Logarithmes acoustiques. — Galin et Chevé. — Le ton de chapelle. — Diapason normal. — Caléidophone. — Méthode optique de M. Lissajous. — Horloge à diapason.

La musique se préoccupe beaucoup moins de la hauteur absolue des notes que de leurs rapports ou *intervalles*. C'est de ces rapports que dépend le plaisir que nous cause l'union de certains sons. Quand deux notes sont dans le rapport de deux nombres entiers très simples, elles forment un accord ou une consonance ; les dissonances sont produites par des rapports complexes. C'est par là qu'on peut dire que la musique est toute dans les nombres.

Pythagore n'ignorait pas que, si on partage une corde en deux sections d'inégale longueur, on obtient deux sons parfaitement consonants toutes les fois que les longueurs des deux parties sont dans un rapport très simple, exprimé par deux nombres entiers. Le rapport 1 : 2 correspond à l'octave, le rapport 2 : 3

la quinte, 3 : 4 à la quarte, et ainsi de suite. Il est très probable que le philosophe grec avait appris cette loi des prêtres d'Égypte : c'est dire qu'elle a été connue depuis les temps les plus anciens.

On sait aujourd'hui que les rapports des cordes sont les rapports inverses des nombres de vibrations. Les intervalles consonants reposent donc directement sur les relations de hauteur des notes. Prenons comme exemple la quinte *ut*, *sol*. L'oreille nous apprend tout d'abord que cette consonance peut exister avec le même caractère relatif entre deux notes très basses ou très élevées, et qu'elle ne dépend guère du nombre absolu des vibrations. Ensuite, les mesures montrent que deux notes qui forment cet intervalle sont toujours dans le rapport de 3 : 2, et réciproquement que cet intervalle est constaté par l'oreille toutes les fois que deux notes sont entre elles comme 3 à 2. Enfin, on s'assure facilement que la consonance est d'autant plus pure, d'autant plus suave, que le rapport en question se trouve plus exactement observé. Dès lors, nous appellerons le rapport 3 : 2 une quinte *juste*.

Les consonances ou accords simples admis par les musiciens sont caractérisés par les rapports suivants :

Octave.	1 : 2
Quinte	2 : 3
Quarte	3 : 4
Tierce majeure	4 : 5
Tierce mineure	5 : 6
Sixte majeure	3 : 5
Sixte mineure	5 : 8

On dit qu'une note est à l'octave aiguë d'une autre lorsqu'elle fait dans le même temps deux fois autant

de vibrations que cette dernière ; inversement, celle-ci est alors à l'octave grave de la première. On distingue les octaves successives d'une note par des chiffres placés en indices ; de cette façon, ut_2 signifie l'octave aiguë d'*ut* (on n'écrit pas : ut_1), ut_3 celle d'ut_2 ou la double octave d'*ut*, etc. Pour descendre aux octaves inférieures, on emploie des indices négatifs : ut_{-1} est l'octave grave d'*ut*, ut_{-2} la double octave, et ainsi de suite.

Il est facile de prévoir que trois ou quatre notes qui, prises deux à deux, seraient consonantes, le resteront encore si on les réunit en accord multiple. C'est en effet ce qui s'observe. Les deux accords triples les plus agréables à l'oreille sont l'*accord parfait majeur*, caractérisé par les trois nombres 4, 5, 6, et l'*accord parfait mineur*, qui l'est par les nombres $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$. L'un et l'autre, ils renferment une quinte ($\frac{6}{4}$ équivaut à $\frac{3}{2}$), une tierce majeure ($\frac{5}{4}$) et une tierce mineure ($\frac{6}{5}$) ; la seule différence, c'est que, dans l'accord parfait majeur, la tierce majeure précède la tierce mineure, tandis que dans l'accord mineur l'ordre est renversé.

Pour réaliser les accords, la musique a dû adopter une échelle de sons appelée *gamme*, qui se compose de sept degrés ; on peut les représenter par les sept notes suivantes (huit en ajoutant l'octave)

ut ré mi fa sol la si ut[1],

qui sont entre elles comme les nombres :

24 27 30 32 36 40 45 48.

Une première gamme se continue par une seconde,

1. En solfiant, on dit *do* pour *ut*.

une troisième, etc., formées chacune en élevant d'une octave toutes les notes de la gamme précédente; on distingue les octaves successives par des indices, ainsi que nous l'avons déjà dit. Les rapports des différentes notes à la première constituent les intervalles musicaux et sont exprimés par les nombres suivants[1] :

ut — *ut*	unisson	1 : 1
ut — *ré*	seconde	8 : 9
ut — *mi*	tierce	4 : 5
ut — *fa*	quarte	3 : 4
ut — *sol*	quinte	2 : 3
ut — *la*	sixte	3 : 5
ut — *si*	septième	8 : 15
ut — ut_2	octave	1 : 2
ut — $ré_2$	neuvième	4 : 9
ut — mi_2	dixième	2 : 5
ut — fa_2	onzième	3 : 8
ut — sol_2	douzième	1 : 3
. . . .	. . . . .	. . .
ut — ut_3	double octave	1 : 4
. . . . .	. . . . .	. . .
ut — mi_3	dix-septième	1 : 5
. . . . .	. . . . .	. . .
etc.	etc.	etc.

On voit que les noms des intervalles rappellent simplement la position des notes dans la gamme. La douzième, la double octave, la dix-septième, constituent des consonances très parfaites, ainsi que le fait prévoir la simplicité des rapports qui les caractérisent; si

1. Ces nombres sont ceux qui ont été adoptés par les physiciens; ils représentent la gamme dite *naturelle*. Nous verrons plus loin qu'il existe d'autres gammes où les intervalles sont un peu différents.

nous ne les avons pas mentionnées précédemment, c'est qu'on les considère comme des *redoublements* de la quinte, de l'octave, de la tierce, desquelles on les déduit en montant d'une octave.

En associant deux à deux les notes d'une gamme, on est loin d'obtenir toujours des consonances ; il faut pour cela faire un choix convenable ; mais l'on sait que les dissonances jouent elles-mêmes un rôle considérable dans la musique. L'intervalle de l'*ut* au *ré*, qui s'exprime par $\frac{8}{9}$ et que l'on appelle aussi un *ton majeur ;* l'intervalle du *ré* au *mi*, qui est égal à $\frac{10}{9}$ et se nomme un *ton mineur ;* les intervalles *mi* — *fa* et *si* — *ut*$_2$, égaux tous deux à $\frac{16}{15}$ et désignés par le nom de *demi-ton diatonique*, sont des dissonances très caractérisées.

La gamme telle que nous venons de l'expliquer ne suppose aucune connaissance de la hauteur absolue des notes ; elle n'en fixe que les rapports. La première note ou *tonique*, comme l'appellent les musiciens, peut être quelconque ; mais une fois sa valeur déterminée, celle de toutes les autres notes l'est aussi. C'est ce qu'on peut remarquer dans les exercices de solfège, qui consistent à chanter les notes de la gamme sur les syllabes *do ré mi fa sol la si*. On peut choisir arbitrairement le son qui représente le *do*, mais, par ce choix, on se donne en même temps la hauteur des autres notes : si le *do* fait, par exemple, 240 vibrations, il faut que le *ré* en fasse 270, le *mi* 300, le *fa* 320, et ainsi de suite; sans quoi on détonne.

Les noms des six premières notes paraissent avoir été introduits en 1026 par le bénédictin Guido d'Arezzo, ou Guy l'Arétin[1] ; ce sont des commen-

1 M. Roqueplan m'a fait remarquer toutefois que, d'après un ouvrage

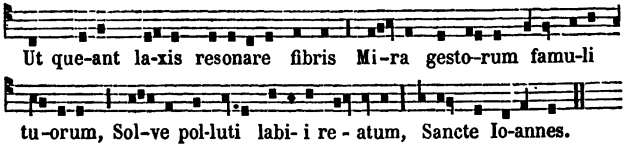
cements de mots tirés de l'hymne de saint Jean-Baptiste :

Ut queant laxis *re*sonare fibris
*Mi*ra gestorum *fa*muli tuorum,
*Sol*ve polluti *la*bii reatum,
Sancte Ioannes.

L'air de cette hymne, tel qu'il se chante aujourd'hui à la Saint-Jean, n'est pas tout à fait l'air ancien, où les syllabes choisies par l'Arétin tombaient effectivement sur les notes qu'elles désignent. Voici cet air, copié sur un manuscrit de la bibliothèque du Chapitre de Sens ; il a été transcrit en notes de plain-chant :

HYMNE DE SAINT JEAN

Air ancien.



Le mot *si*, tiré du quatrième vers (S et I), n'a été ajouté pour désigner la septième note qu'en 1684, par Lemaire. En Italie, on substitua bientôt, pour les besoins du solfège, à la syllabe *ut*, qui parut trop sourde, la syllabe *do*. L'usage des dénominations proposées par Guy ne se répandit pas très promptement, car du temps de Jean de Muris, au quatorzième siècle,

du quinzième siècle, qui existe à la bibliothèque Sainte-Geneviève, les noms des notes auraient été imaginés par « un nommé Phontus Teutonicus d'Allemaigne. » Enfin, d'après Bohlen, ces noms seraient d'origine persane, car en Perse on solfie sur les mots *durr-i mufassal* (chapelet de perles).

on solfiait encore à Paris sur les syllabes *pro to no do tu a;* mais à la fin elles l'emportèrent et furent admises assez généralement, sauf en Angleterre et en Allemagne, où l'on a conservé pour les notes les noms de lettres C D E F G A B (ou H).

Voici l'origine de cette dernière désignation. Depuis Grégoire le Grand, peut-être déjà avant le sixième siècle, on avait formé une série de gammes de notes fixes, correspondant aux limites de la voix et aux sons des principaux instruments, et on les désignait à l'aide des sept premières lettres de l'alphabet, de cette façon :

A B C D E F G a b c d e f g a a b b c c...

Plus tard, une note ayant été ajoutée en bas, on prit pour la désigner le *Gamma* ou G grec; de là le nom de la gamme.

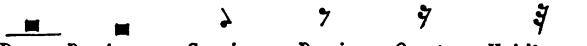
Guy d'Arezzo substitua à ces lettres des points posés sur des lignes parallèles, les *portées*, à chacune desquelles une lettre servait de *clef*. La clef fixait la valeur de la portée : ainsi, lorsqu'on avait écrit une F à l'origine d'une portée, tous les points placés sur cette portée représentaient la note F. Dans la suite, on grossit ces points, on s'avisa d'en poser dans les espaces compris entre les lignes, et on multiplia selon le besoin ces lignes et ces espaces. Pour indiquer un accord, on plaçait les points les uns au-dessus des autres; de là le nom de *contre-point* donné à la science des accords.

Les signes des notes n'eurent d'abord d'autre usage que de marquer les différences d'intonation, sans égard à la durée. Jean de Muris ou Moeurs inventa, vers 1338, des figures carrées pour distinguer la valeur ou durée relative des notes, et ces figures furent perfectionnées

par Octavio Petrucci, qui trouva en 1502 le moyen d'imprimer la musique avec des types mobiles. De modifications en modifications, les signes des notes ont pris la forme suivante :

Ronde. Blanche. Noire. Croche. Double croche. Triple croche.

Une *ronde* vaut deux *blanches*, une *blanche* deux *noires*, et ainsi de suite. Ces notes peuvent être remplacées par des *silences* équivalents :



Pause, Demi-pause. Soupir. Demi-soupir. Quart de soupir. Huitième de soupir.

Pour fixer la durée *absolue* des notes, on emploie le métronome.

La lettre G est devenue la *clef de sol* 𝄞, la lettre F la *clef de fa* 𝄢, la lettre C la *clef d'ut* 𝄡, etc.

Les syllabes *ut ré mi fa sol la* ne désignaient pas, dans l'origine, des notes fixes, mais seulement les degrés d'une gamme quelconque; ils représentaient l'hexachorde de Guy d'Arezzo. On les écrivait au-dessous des lettres qui désignaient les gammes fixes.

La même note fixe pouvait donc occuper différents degrés dans la gamme mobile, ce qui était quelquefois incompatible avec la conservation des intervalles. Il en résultait différents modes plus ou moins harmonieux et une grande confusion du système musical. On sentit bientôt la nécessité d'altérer certaines notes fixes quand la gamme mobile était transposée de manière que les

intervalles des notes fixes correspondantes ne réalisaient pas les intervalles primitivement désignés par les notes *ut ré mi fa sol la*. Ainsi, quand *ut* s'écrivait au-dessous de F, et *fa* au-dessous de B, il aurait fallu que l'intervalle de F à B fût une quarte; mais, comme en réalité il était plus grand, on le diminuait en baissant B d'un demi-ton. Cette note devenait alors le *b molle*, tandis qu'elle était *b durum* dans la gamme qui commençait à C; on indiquait ce double rôle en écrivant un *b* rond ou carré, et c'est de là que viennent les signes du bémol (♭) et du bécarre (♮).

Ce n'est qu'après mille vicissitudes et tâtonnements que le système musical a pris sa forme actuelle. La règle principale est celle-ci : quelle que soit la note fixe par laquelle on commence la gamme, il faut que les autres notes reproduisent les intervalles ou rapports une fois adoptés. Pour satisfaire à cette condition, on *altère* les notes fixes, soit en les élevant d'un demi-ton, ce qui s'appelle *diéser* et s'exprime par le signe ♯, soit en les abaissant d'un demi-ton, ce qui s'appelle *bémoliser* et s'indique par un ♭. Pour valeur de ce demi-ton, on prend le rapport $\frac{25}{24}$, qui est plus petit que $\frac{16}{15}$, valeur de l'intervalle *mi* — *fa*.

Les syllabes *ut ré mi fa sol la si* s'emploient maintenant pour désigner les principales notes fixes du piano et des autres instruments; en les faisant suivre des mots *dièse* ou *bémol*, on obtient le nom des notes altérées, représentées sur le piano par les touches noires. Les gammes ou *tons* portent toujours le nom de leur première note, de la *tonique*. Toutes les gammes dites *majeures* sont modelées sur la gamme primitive d'*ut*, formée par la série des notes naturelles :

ut ré mi fa sol la si ut,

avec deux demi-tons (du 3e au 4e et du 7e au 8e degré). Ces gammes constituent le mode majeur. Le mode mineur est formé de gammes dont le type est la gamme de *la* mineur. Elle se fait avec deux demi-tons :

GAMME MONTANTE.

la si ut ré mi fa ♯ sol ♯ la,

GAMME DESCENDANTE.

la sol fa mi ré ut si la,

ou bien avec trois demi-tons :

la si ut ré mi fa sol ♯ la.

La principale différence des deux modes réside dans l'introduction de la tierce mineure *la-ut* (5 : 6) à la place de la tierce majeure *ut-mi* (4 : 5). Ils sont caractérisés chacun par un accord parfait, formé avec la tierce et la quinte de la tonique :

accord parfait majeur. . .	*ut*	*mi*	*sol*
accord parfait mineur. . .	*la*	*ut*	*mi*, ou bien
	ut	*mi* ♭	*sol*.

Si on voulait réaliser toutes ces gammes dans leur pureté théorique sur les instruments à sons fixes, on en compliquerait singulièrement la construction. Il a donc fallu chercher un accommodement, et on l'a trouvé dans la *gamme tempérée*. L'oreille tolère encore des intervalles qui s'éloignent un peu des consonances parfaites, et cette circonstance a permis de simplifier l'échelle des notes fixes, en confondant celles qui naissent de l'altération inverse de deux notes naturelles voisines. On réunit donc l'*ut* ♯ au *ré* ♭, le *ré* ♯ au *mi* ♭, et ainsi de suite. De cette façon, il suffit d'intercaler cinq

touches noires entre les sept touches blanches de chaque octave du piano pour obtenir une *gamme chromatique*, formée de douze demi-tons égaux, qui se prête à toutes les exigences du système musical. Il est vrai qu'on se trouve par là conduit à altérer aussi, d'une manière plus ou moins sensible, les notes naturelles représentées par les touches blanches, et à modifier tous les intervalles musicaux.

Les demi-tons tempérés peuvent être approximativement représentés par le rapport $\frac{18}{17}$, et un ton tempéré diffère à peine d'un ton majeur $\frac{9}{8}$. La quinte et la quarte ne sont faussées par le tempérament égal que d'une manière tout à fait insensible, mais les tierces le sont beaucoup plus. Quelques auteurs du siècle dernier donnent le nom de *loups* à ces intervalles sacrifiés où les dissonances semblent se donner rendez-vous pour hurler.

Mentionnons encore, pour mémoire, la gamme dite *pythagoricienne*, qui s'obtient par une succession de quintes (*fa*, *ut*, *sol*, *ré*, *la*, *mi*, *si*,) transportées ensuite dans la même octave, et dont les intervalles sont les suivants :

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{243}{128}$	2

tandis que la gamme naturelle (qu'on attribue à Ptolémée) est représentée pas les rapports :

1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

En prolongeant la série de quintes des deux côtés, on obtient aussi les notes intermédiaires, les dièses et

les bémols. La facilité qu'on trouvait à accorder les cordes de la lyre par quintes a été sans doute la raison principale du choix de ce système, adopté par Guy d'Arezzo et par d'autres musiciens.

Pour juger des différences qui existent entre les gammes en question, il y a tout avantage à exprimer les intervalles, non plus par des *rapports*, mais (comme le voulaient Sauveur et de Prony) par des nombres qu'on appelle *logarithmes acoustiques*. Cela revient tout simplement à prendre pour unité de mesure un intervalle quelconque, par exemple le ton tempéré, puis à compter le nombre de tons entiers et la fraction de ton que contient chacun des intervalles considérés. Au lieu d'avoir à multiplier entre eux les rapports, ou à les diviser les uns par les autres, pour former de nouveaux intervalles, on n'a plus dès lors qu'à ajouter ou à retrancher les nombres de tons qui en forment l'équivalent. Ainsi l'on dira : l'octave vaut 6 (six tons), la double octave 12, la tierce majeure tempérée 2, la tierce mineure 1,50; différence 0,50. Le demi-ton tempéré vaut 0,50; en l'ajoutant à la tierce majeure, on trouve 2,50 pour la quarte, et ainsi de suite. Le demi-ton chromatique ($\frac{25}{24}$) vaut 0,35; en l'ajoutant à la valeur d'une note, on a celle du dièse, etc. La seconde mineure ($\frac{16}{15}$) vaut 0,56, le comma ($\frac{81}{80}$) vaut 0,11; on voit que neuf commas font un ton tempéré. Voici maintenant la valeur des intervalles de la gamme tempérée, de la gamme pythagoricienne et de la gamme naturelle, en tons tempérés. J'ajoute la tierce mineure et la septième mineure.

NOTES	GAMMES. TEMPÉRÉE	PITHAGOR.	NATURELLE
ut	0,00	0,00	0,00
ré	1,00	1,02	1,02
mi ♭	1,50	1,47	1,58
mi	2,00	2,04	1,95
fa	2,50	2,49	2,49
sol	3,50	3,51	3,51
la	4,50	4,53	4,42
si	5,00	4,98	5,09
si ♭	5,50	5,55	5,44
ut	6,00	6,00	6,00

On voit que la quinte et la quarte tempérées s'écartent à peine des intervalles justes, qui sont communs aux deux autres gammes (la différence ne dépasse pas un centième de ton, ou un dixième de comma). Presque partout, la différence est assez faible entre la gamme tempérée et la gamme pythagoricienne, tandis que celle-ci s'éloigne beaucoup de la gamme naturelle : l'écart est d'un comma pour les tierces, pour les sixtes et pour les septièmes.

D'après M. Helmholtz et un certain nombre de musiciens qui partagent ses idées, la gamme naturelle serait supérieure à toutes les autres et notamment à la gamme tempérée. A en croire le savant théoricien, une voix naturelle qui n'est guidée que par l'instinct donne toujours les intervalles purs; de même les violonistes qui n'ont pas l'oreille rompue aux sons des orchestres jouent naturellement les tierces et les sixtes justes. Par malheur, sous l'influence écrasante de l'orchestre, les violonistes s'habituent à jouer faux ; la justesse de la voix s'altère aussi, et l'oreille n'est plus choquée par les défauts des intervalles tempérés.

D'autre part, MM. Cornu et Mercadier ont tiré de leurs expériences cette conclusion assez inattendue, que les intervalles formés par les sons successifs d'une mélodie sans modulations appartiennent à la gamme pythagoricienne, tandis que les sons simultanés des accords appartiennent à la gamme naturelle. Cette dernière, qui fournit incontestablement les accords les plus purs, serait donc la gamme harmonique par excellence ; mais la vraie gamme mélodique serait celle de Pythagore, la tierce mélodique étant d'un comma plus haute que la tierce harmonique.

A y regarder de près, il semble cependant que les résultats invoqués pour la gamme pythagoricienne puissent aussi bien s'interpréter en faveur de la gamme tempérée, avec laquelle le piano et les orchestres nous ont depuis longtemps familiarisés. On peut dire encore avec M. Helmholtz que, dans une suite mélodique de sons, la tierce n'est pas au nombre des intervalles caractérisés d'une manière certaine; enfin, que beaucoup d'artistes et d'amateurs préfèrent la tierce naturelle même comme tierce mélodique.

Lorsqu'on assiste à ces discussions sans idée préconçue, on ne peut s'empêcher de faire les remarques suivantes. Sans doute, la gamme naturelle fournit les consonances les plus parfaites. Mais la musique a-t-elle besoin d'accords absolument parfaits? La dissonance n'y joue-t-elle pas le même rôle que le sel dans l'art culinaire? Ce qui confirmerait cette manière de voir, c'est ce fait que, à l'exception de l'octave et des autres consonances absolues (1 : 3, 1 : 4, etc.), les meilleures consonances ne sont pas complètement exemptes de l'élément de trouble qui, comme nous le verrons plus loin, constitue la dissonance. Tout son musical est

même légèrement dissonant en lui-même, à cause des harmoniques supérieurs qu'il renferme. Enfin, des accords franchement dissonants sont constamment employés en musique, et il serait impossible de s'en passer. Si l'on se rappelle encore les résultats des curieuses recherches de M. Barbereau sur la tolérance de l'oreille, qui ont mis en évidence la marge laissée pour la définition numérique de certains intervalles, et qu'on songe à la difficulté d'avoir des instruments accordés avec une précision absolue, il sera permis de trouver un peu exagérée l'importance que certains théoriciens attachent aux rapports simples, considérés comme base de l'harmonie. Il semble suffisant d'adopter des intervalles qui se rapprochent *le plus possible* de ces rapports, tout en offrant d'autres avantages que les rapports simples ne peuvent procurer, et ces avantages, on les trouve précisément dans les douze intervalles égaux de la gamme tempérée.

Si l'on adopte ce point de vue, la gamme tempérée n'est plus un pis aller, mais la vraie solution du problème des intervalles musicaux, comme paraît l'avoir admis déjà Sébastien Bach. Elle est d'ailleurs tellement passée dans nos habitudes, que les chanteurs par exemple, laissés à leur inspiration, tomberont souvent à leur insu, et en quelque sorte malgré eux, sur les intervalles tempérés. N'oublions pas d'ailleurs que la quinte et la quarte tempérées diffèrent à peine des intervalles justes ; l'écart n'est vraiment sensible que pour la tierce et pour les intervalles qui en dérivent. Il ne serait donc pas étonnant que la gamme tempérée finît par triompher des autres gammes dans le combat pour la vie, en vertu du principe de sélection qui veut que les êtres doués des qualités les plus solides l'empor-

tent sur les autres et leur survivent. Je ne veux pas dire que les musiciens dont l'oreille ne pourra pas supporter le tempérament égal soient, eux aussi, destinés à être éliminés et à disparaître, en vertu du même principe de sélection ; mais ils sont menacés.

Quoi qu'il en soit, les inconvénients du tempérament égal ont été le motif d'une foule de tentatives pour revenir aux accords naturels, même dans la musique instrumentale. La harpe à double mouvement d'Erhard, les orgues dites enharmonique de Poole et du général Perronet Thompson, l'harmonium imaginé par M. Helmholtz, celui de M. Guéroult, permettent de jouer dans tous les tons sans tempérer.

L'enseignement de la musique vocale, tel qu'il a été propagé en France par Galin et Chevé, tel que le pratiquent en Angleterre les nombreuses *Tonic-solfa-Associations* ou sociétés de solfège, s'en tient également aux gammes naturelles. Les sociétés anglaises emploient pour solfier les syllabes *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *ti*, *do*, et réduisent l'écriture musicale aux lettres *d*, *r*, *m*, *f*, *s*, *l*, *t*, *d*. Galin, Paris et Chevé emploient au même usage les chiffres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ; les octaves successives sont indiquées par des points ou des barres qui se placent au-dessus ou au-dessous des chiffres. Il ne reste plus alors qu'à donner la hauteur absolue de la tonique 1, pour que toutes les notes soient parfaitement déterminées. On voit quelle simplification s'obtient par ce procédé (déjà recommandé par Rousseau), et combien il rend la musique plus populaire et plus accessible aux personnes qui n'ont pas de temps à perdre.

« La musique, dit J.-J. Rousseau, a eu le sort des arts qui ne se perfectionnent que lentement. Les inventeurs des *notes* n'ont songé qu'à l'état où elle se trouvait de

leur temps, sans songer à celui où elle pouvait parvenir ; et dans la suite, leurs signes se sont trouvés d'autant plus défectueux, que l'art s'est plus perfectionné. A mesure qu'on avançait, on établissait de nouvelles règles pour remédier aux inconvénients présents ; en multipliant les signes, on a multiplié les difficultés, et à force d'additions et chevilles on a tiré d'un principe assez simple un système fort embrouillé et fort mal assorti...

« Les musiciens, il est vrai, ne voient point tout cela. L'usage habitue à tout. La musique pour eux n'est pas la science des sons ; c'est celle des noires, des blanches, des croches, etc. Dès que ces figures cesseraient de frapper leurs yeux, ils ne croiraient plus voir de la musique. D'ailleurs ce qu'ils ont appris difficilement, pourquoi le rendraient-ils facile aux autres ? Ce n'est donc pas le musicien qu'il faut consulter ici, mais l'homme qui sait la musique et qui a réfléchi sur cet art. »

Lorsqu'on veut jouer un morceau d'ensemble, il est évidemment indispensable que tous les instruments soient d'accord ; c'est pour cela que, dans les orchestres on les met à l'unisson au moyen d'un diapason qui garde une note fixe : c'est d'habitude le *la*, la note de la troisième corde du violon. Autrefois, le ton était donné à l'orchestre par une espèce de sifflet muni d'un piston gradué à l'aide duquel on pouvait raccourcir ou allonger le tuyau à volonté, afin d'en tirer différents sons fixes marqués sur la division. Il y avait le *ton du chœur* pour le plain-chant, et pour la musique profane le *ton de chapelle* et le *ton d'opéra*. Ce dernier n'avait rien de fixe, on le haussait ou le baissait suivant la portée des voix ; le ton de chapelle, au contraire, était fixe, du moins en France, et ordinairement plus élevé que le ton d'opéra. Quant au ton du chœur, qui s'accordait

avec l'orgue, il est difficile de dire s'il était plus bas ou plus élevé que le ton de chapelle, car les auteurs se contredisent sur ce point ; à la fin, il parait qu'on mettait simplement l'orgue au ton de chapelle.

Depuis que la science est en possession de méthodes qui permettent de mesurer la hauteur absolue des notes, on a de temps à autre déterminé le ton des principaux orchestres d'Europe et, chose curieuse, on a constaté que partout il s'est élevé dans une progression rapide. Sauveur, qui paraît avoir étudié cette question le premier, trouva en 1700 que le *la* du bas du clavecin faisait 202 vibrations, et l'*ut* du bas du clavecin, ou celui d'un tuyau d'orgue de 8 pieds ouvert, 244 vibrations, ce qui donnait un la_3 de 810. D'autres déterminations du siècle dernier varient entre 820 et 850. En 1833, Henri Scheibler examina les diapasons des principaux théâtres et trouva qu'à l'Opéra on en avait deux de 853 et de 868, aux Italiens et au Conservatoire d'autres de 870 et de 881 vibrations ; à Berlin, il trouva un *la* de 883 ; à Vienne, les diapasons variaient de 867 à 890 vibrations. En 1857, M. Lissajous trouva les nombres suivants :

Opéra de Paris.	896
Opéra de Berlin	897
Théâtre de San Carlo, Naples . . .	890
Théâtre della Scala, Milan	903
Théâtre-Italien de Londres. . . .	904
Maximum à Londres.	910

Cette élévation croissante du ton des instruments est encore attestée par les anciennes orgues qui existent dans quelques basiliques. Quelle est la raison qui pousse les musiciens et les facteurs à monter sans cesse? On suppose que la plupart des instruments ont plus

d'éclat dans les notes élevées, et que c'est pour cela que les facteurs en ont peu à peu haussé le ton. Les chanteurs suivent en général la même pente, au détriment de leur voix. Toutefois, on est allé trop loin en attribuant la ruine de tant de beaux organes à l'élévation du diapason ; il serait plus juste d'en chercher la cause avec Berlioz dans la tendance des compositeurs modernes à écrire plus haut pour les voix que les anciens auteurs. Quelle que soit la hauteur du diapason, il est facile au compositeur de se renfermer dans des limites raisonnables.

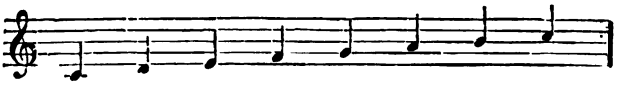
Il n'en est pas moins vrai que la variation progressive du diapason devait à la fin inquiéter les musiciens et qu'il était urgent de convenir d'un ton normal et absolument fixe. Sauveur avait insisté dès 1700 sur la nécessité d'adopter un son fixe. Il proposa d'abord pour cet usage le son qui fait juste 200 vibrations par seconde et qu'il croyait être le *la* d'un tuyau de 5 pieds ouvert. Plus tard, ayant reconnu que ce *la* était en réalité un peu plus élevé, il s'arrêta à un autre ordre d'idées et proposa de prendre pour son fixe un *ut* de 512 vibrations. On arrive à ce nombre par la progression 1, 2, 4, 8,.. en doublant toujours, ou, ce qui est la même chose, en formant les octaves successives de l'unité. Chladni adopta plus tard le même *ut* de 512 vibrations, auquel correspond un *la* naturel de 853 $\frac{1}{3}$, et on le trouve ensuite employé par la plupart des savants. Cependant, comme le ton des orchestres montait toujours, les physiciens allemands, réunis à Stuttgart en 1834, décidèrent qu'il fallait choisir un *la* normal plus en harmonie avec l'usage des musiciens, et ils choisirent un *la* de 880 vibrations. Par malheur, le congrès de Stuttgart ne sut pas se faire écouter ; les

diapasons montèrent toujours et d'une manière désordonnée. C'est alors que le décret du 16 février 1859 fixa pour la France un diapason officiel. Ce diapason donne le *la* de 870 vibrations.

Voici les nombres des vibrations simples de la gamme tempérée fondée sur le la_3 français, et de la gamme naturelle qui commence par le même *ut*. On obtient les octaves en doublant ou en divisant par 2.

NOTES.	GAMME TEMPÉRÉE.	GAMME NATURELLE.	RAPPORTS NATURELS.
ut_3	517,3	517,3	24
ré	580,7	582,0	27
mi	651,8	646,6	30
fa	690,5	689,7	32
sol	775,1	776,0	36
la	870,0	862,2	40
si	976,5	970,0	45
ut_4	1034,6	1034,6	48

C'est l'octave moyenne du piano représentée par les notes suivantes :



Désormais, tous les instruments seront accordés au moyen de diapasons comparés à l'étalon officiel du Conservatoire ; l'unité est donc assurée, et il n'y a plus à craindre que le ton des orchestres puisse monter.

On accorde ordinairement le piano, le violon et les autres instruments avec le secours de l'oreille. Une corde est mise à l'unisson du diapason, les autres sont accordées par les intervalles musicaux, principalement par octaves et quintes.

D'après les essais de Weber, une oreille très fine peut

encore apprécier directement une différence d'un millième, ou d'une vibration sur mille ; c'est la limite. Cependant, l'observation des battements, phénomène dont il sera question plus loin, permet d'aller beaucoup plus loin; aussi est-ce par ce moyen qu'on accorde les orgues. Lorsqu'il s'agit d'obtenir une précision extrême, on a recours à une dernière méthode, due à M. Lissajous; c'est la *méthode optique*, dont nous allons essayer d'expliquer le principe.

Une verge prismatique peut vibrer transversalement de telle sorte que l'extrémité libre décrive une ligne plane. Si cette extrémité porte une perle d'acier ou de verre étamé, la persistance des impressions lumineuses la fera paraître sous la forme d'un trait brillant. L'œil en effet a la faculté de conserver pendant un quinzième de seconde environ les impressions les plus fugitives ; si donc le point lumineux met moins de $\frac{1}{15}$ de seconde à parcourir son chemin, tout cet espace paraîtra illuminé. C'est ainsi qu'un charbon ardent que l'on fait tourner en fronde dessine dans l'air un cercle flamboyant[1].

Si la section de la tige est rectangulaire, on peut la faire vibrer soit dans le sens de l'épaisseur, soit dans celui de la largeur. Dans les deux cas, la petite perle dessinera une ligne droite lumineuse ; la route qu'elle parcourt dans le premier cas est perpendiculaire à celle qu'elle suit dans le second. Mais nous pouvons encore ébranler la tige d'une autre manière en la frappant obliquement. Elle se trouve alors poussée à la fois dans deux chemins qui se croisent à angle droit : elle cède un instant à l'impulsion qui l'entraîne dans le sens de

1. M. Marey a pu étudier le vol des insectes en dorant les bouts des ailes.

l'épaisseur, puis un instant à celle qui la pousse dans le sens de la largeur, et ainsi de suite ; la petite perle parcourt un chemin plus ou moins entortillé dont le sillon lumineux permet de suivre la verge dans ses évolutions rapides.

Le nombre des vibrations droites est toujours proportionnel à la dimension dans laquelle la verge vibre. Si elle a une section carrée, qu'elle soit aussi épaisse que large, le nombre des vibrations est le même dans les deux sens. Dans ce cas, la perle, frappée obliquement, décrira une ellipse qui pourra s'arrondir en cercle ou s'aplatir jusqu'à devenir une ligne droite. Le calcul le fait prévoir. On comprend même *a priori* la ligne droite en supposant que la verge s'écarte diagonalement de sa position de repos en faisant toujours de petits pas *égaux* en avant et à droite, en avant et à droite, pour retourner, en arrière et à gauche, en arrière et à gauche, et ainsi de suite, comme le montre la fig. 88. Pour expliquer l'ellipse, il nous faudrait entrer dans des considérations trop élevées.

Fig. 88. Vibrations d'une tige carrée.

Quand les deux dimensions de la verge sont comme 1 : 2, les nombres de vibrations correspondants seront évidemment dans le rapport de l'octave ; si les dimensions sont comme 2 : 3, les vibrations seront à la quinte, etc. La perle décrit alors les courbes représentées plus loin par les figures 92 et 93. On peut donc dire

que ces figures caractérisent les intervalles musicaux.

C'est sur ce principe que repose le *caléidophone* de M. Wheatstone, appareil composé d'une série de verges prismatiques dont les côtés sont dans les rapports des intervalles consonants (fig. 89). Chaque verge porte au bout une petite perle qui décrit l'une des courbes représentées par les figures quand on fait vibrer la verge par un petit coup donné avec le doigt. M. Wheatstone

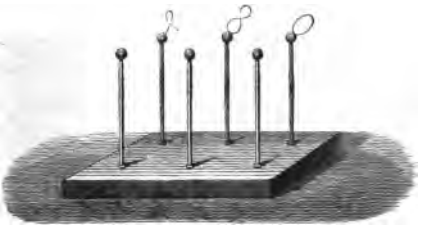


Fig. 89. Caléidophone.

fit connaître cet appareil en 1827; on le trouve aujourd'hui dans tous les cabinets de physique [1]. Voici maintenant l'admirable parti que M. Lissajous a tiré du même principe.

Imaginons un petit miroir fixé contre l'une des branches d'un diapason maintenu par un support. Sur ce miroir faisons tomber un rayon lumineux (en plaçant un peu en avant une lampe entourée d'une cheminée opaque dans laquelle est percé un petit trou pour laisser passer la lumière). Tant que le miroir reste immobile, le rayon réfléchi dessine sur le mur un simple point brillant; si on regarde directement dans la glace et

1. On peut obtenir les mêmes figures avec un pendule suspendu à l'extrémité d'un autre pendule, et oscillant d'avant en arrière pendant que l'autre oscille de droite à gauche.

qu'on y cherche l'image de la lampe, on aperçoit la petite lumière comme une étoile parfaitement fixe. Mais si le diapason vient à être ébranlé, le rayon réfléchi partage l'oscillation du miroir, l'image se déplace sur le mur, le point brillant se change en trait lumineux. Si le diapason est dans une position verticale, sa vibration produit un trait lumineux vertical; s'il est maintenu dans une position horizontale, il produit un trait horizontal.

Supposons maintenant qu'au lieu d'un seul miroir

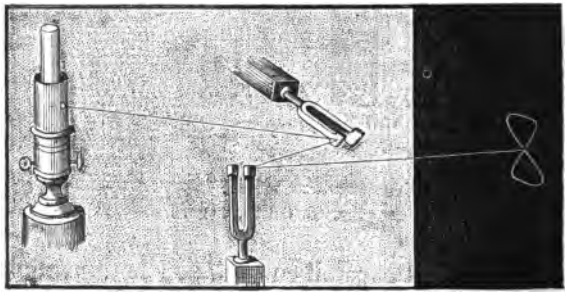


Fig. 90. Méthode optique de M. Lissajous.

on en emploie deux, fixés contre les branches de deux diapasons placés à équerre, l'un horizontal, l'autre vertical, comme dans la figure 90. Le premier imprime au rayon réfléchi un mouvement horizontal, le second, qui le reçoit à son tour, le balance verticalement, et ces deux oscillations rectangulaires se combinent, comme dans le cas du caléidophone, pour donner naissance aux courbes diverses que représentent les figures 91-94. On les observe, soit en regardant directement dans le second miroir, soit en recevant l'image du point lumineux sur un écran quelconque; on lui donne plus de netteté et d'éclat en faisant passer les

rayons lumineux à travers une lentille. L'inspection seule des courbes fait reconnaître le rapport dans lequel se trouvent les nombres de vibrations respectifs des deux diapasons, une ligne droite ou une ellipse in-

Fig. 91. Unisson 1 : 1.

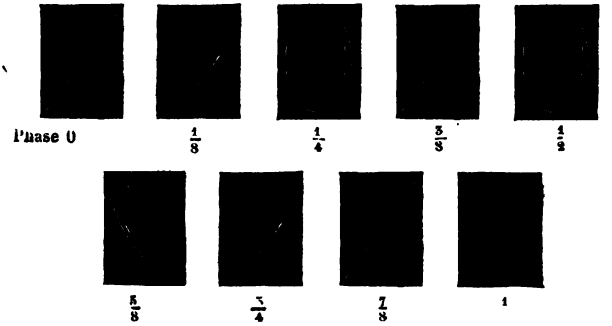
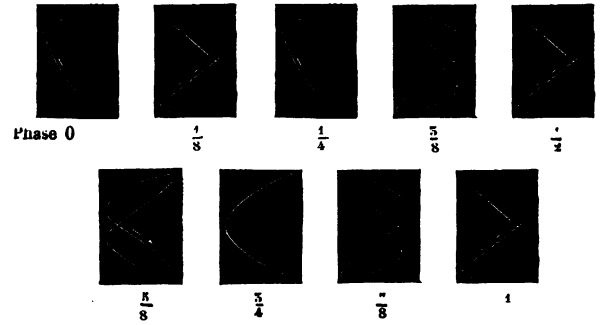


Fig. 92. Octave 1 : 2



diquent l'unisson, un huit de chiffre l'octave, et ainsi de suite.

C'est en cela que consiste la *méthode optique de comparaison des vibrations sonores*, que M. Lissajous a fait connaître en 1855. Elle permet d'apprécier l'in-

tervalle musical de deux corps vibrants avec une certitude inconnue avant cette belle découverte.

On peut se demander pourquoi un même rapport donne lieu à plusieurs figures distinctes. Cela vient des

Fig. 93. Quinte 2 : 3.

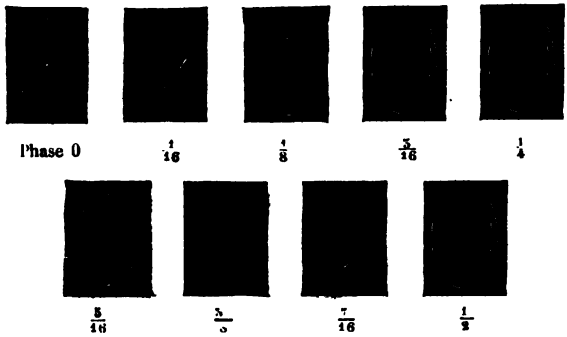
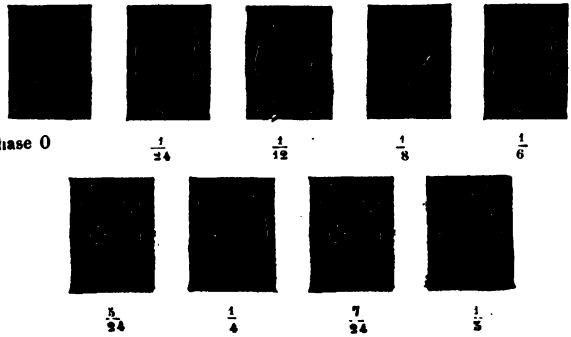


Fig. 94. Quarte 3 : 4.



différences de *phase*. Si l'un des deux miroirs commence à vibrer au moment où l'autre a déjà accompli une partie de sa course, ce retard, que l'on nomme la *différence de phase* ou simplement la *phase*, modifie l'apparence de la figure qui résulte de la combinaison

des deux mouvements. Ainsi, quand deux diapasons qui sont à l'unisson commencent et finissent ensemble leur course (quand la phase est nulle), la trajectoire de l'image lumineuse est une ligne droite; dans tous les autres cas, c'est une ellipse ou un cercle. Nous avons écrit au-dessous de chacune de nos figures la différence de phase correspondante, en fraction d'une vibration entière.

Quand les vibrations des deux diapasons sont exactement dans le rapport de deux nombres entiers, la figure optique qu'ils donnent en commençant leur mouvement reste la même pendant toute la durée de ce mouvement, à cela près qu'elle diminue de grandeur à mesure que les vibrations s'éteignent. Dans ce cas, on n'observe donc qu'une seule des courbes qui caractérisent l'intervalle musical dont il s'agit. Mais si l'accord des diapasons n'est pa parfait, s'ils sont légèrement dissonants, la figure ne reste pas fixe, elle se transforme progressivement de manière à parcourir le cycle complet des courbes diverses qui correspondent au même intervalle. C'est que le retard ou la différence de phase augmente alors sans cesse, comme l'écart de deux pendules qui ne sont pas d'accord; il s'ensuit que la figure change aussi d'une manière continue. La transformation est d'autant plus rapide que le désacord des diapasons est plus prononcé. Il en résulte pour l'ellipse, qui caractérise l'unisson, un balancement dans lequel elle s'incline tantôt à droite, tantôt à gauche, en se fermant à chaque fois de manière à passer par la forme d'une ligne droite. Cette titubation des figures trahit immédiatement le plus léger désaccord, et permet, en outre, d'en apprécier la valeur.

C'est par ce moyen que les diapasons destinés à don-

ner le *la* normal sont comparés à l'étalon du Conservatoire : une fois corrigés et reconnus exacts. ils sont

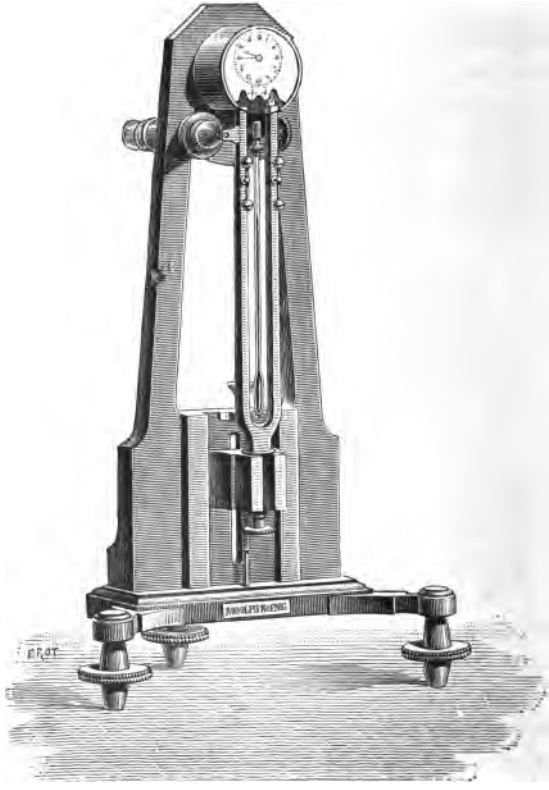


Fig. 95. Horloge à diapason.

poinçonnés comme l'argenterie à la Monnaie. Cette opération se fait nécessairement sans que le diapason à pomparer soit orné d'un miroir, qui en changerait la note ; si les branches sont polies, elles servent comme des miroirs, si elles ne le sont pas, il suffit de bien

fixer un point de leur surface en se servant d'un microscope.

Au reste, M. Lissajous a généralisé l'emploi de son procédé par l'invention du *comparateur optique*. C'est un microscope dont l'objectif, séparé du tube, est porté par l'une des branches d'un diapason placé à angle droit avec le tube. Quand le diapason vibre, il fait danser l'objectif devant le tube, et les objets que l'on voit dans le champ du microscope semblent osciller dans le même sens. Si maintenant l'un des objets vibre lui-même dans un sens différent, la vibration réelle et la vibration apparente se composent, et la courbe qui en résulte peut faire connaître le nombre des vibrations du corps que l'on étudie.

Tout récemment M. Kœnig a utilisé, pour déterminer d'une manière exacte le nombre de vibrations d'un diapason étalon, l'horloge à diapason de M. Niaudet-Breguet, où une roue avance d'une dent à chaque vibration. Dans l'appareil de M. Kœnig, construit avec l'aide de M. Brown (fig. 95), un thermomètre fixé entre les branches du diapason permet d'observer l'influence de la température sur le nombre de vibrations, et un comparateur optique sert à comparer l'étalon à un autre diapason quelconque. Les aiguilles qui cheminent sur les trois cadrans de l'horloge indiquent les heures, les minutes, les secondes et les 128es de seconde (l'étalon fait 128 vibrations simples par seconde). Au bout de quelques heures, on a ainsi compté plusieurs millions de vibrations, et l'on arrive à une précision presque absolue, en maintenant la température suffisamment constante. L'influence de la température se traduit, en somme, par une diminution de $\frac{1}{9000}$ du nombre des vibrations pour une élévation de 1° centigrade.

XI

LE TIMBRE

Forme des ondes. — Vibrations pendulaires. — Sons simples et sons complexes. — Harmoniques. — Timbre de la voix et des instruments de musique. — Sons musicaux. — Voyelles. — Résonnance multiple. — Analyse du timbre

Nous avons vu que le ton ou la hauteur d'une note dépend de la rapidité avec laquelle se succèdent ses vibrations. Est-ce là toute la différence qui peut exister entre deux ons? Évidemment non, car on ne confond point les sons d'origine diverse lors même qu'ils sont à l'unisson; ils se distinguent encore par une qualité originelle que l'on nomme le *timbre*. Les sons du cor ne ressemblent point à ceux d'une harpe, le violon résonne autrement qu'un tuyau d'orgue. La même note a un caractère différent suivant qu'on la chante sur un *A* ou sur un *O*, d'où il suit que les voyelles ne représentent que le timbre changeant de la voix humaine; on pourrait même classer les timbres des instruments de musique en déterminant les voyelles dont ils semblent se rapprocher le plus.

D'où vient le timbre? Comment la même note peut-

elle produire des impressions si différentes? Cette question a longtemps préoccupé les savants, et ce n'est que dans ces derniers temps que, grâce surtout aux recherches de M. Helmholtz, elle a été résolue d'une manière satisfaisante [1].

On avait toujours pensé, et avec raison, que le timbre devait avoir quelque rapport avec la forme particulière des vibrations du corps sonore. Une pareille différence se découvre aisément dans les ondulations des liquides : il y a des ondes d'aspect différent, des ondes pointues, crénelées, aplaties, offrant cependant toutes la même période de succession. Un coup de vent qui frise la surface de l'eau y fait naître une foule de petites rides qui changent la forme des vagues sans en ralentir ni en accélérer le mouvement général. Mais qu'est-ce que la *forme* d'une vibration fixe comme celle d'une corde, pendant laquelle tous les points du corps vibrant ne font que monter et descendre, c'est-à-dire parcourir dans deux sens opposés la même ligne droite?

Voici la réponse. De même qu'on peut aller de mille manières, en un quart d'heure, de l'Arc de triomphe de l'Étoile à la place de la Concorde, — par exemple, en flânant pendant cinq minutes, en accélérant le pas pendant les cinq minutes suivantes, et en reprenant ensuite une allure tranquille, — de même une molécule qui vibre peut se transporter de plus d'une manière, en un centième de seconde, d'une extrémité à l'autre du chemin qu'elle doit parcourir. Elle peut aller d'abord lentement, puis très vite, et enfin ralentir sa course; mais elle peut aussi se relâcher deux ou trois fois avant

1. Constatons cependant que le principe de la théorie du timbre se trouve déjà nettement énoncé dans le Traité de Physique de Biot. Il paraît aussi que Monge avait à ce sujet des idées parfaitement justes.

d'arriver au bout de sa route. La méthode graphique et le miroir tournant nous permettent de constater ces accès de vitesse qui ont lieu pendant une même oscillation. Une feuille de papier enfumé qui se déplace rapidement sous une pointe vibrante, garde la trace visible de toutes les irrégularités du mouvement oscillatoire; on les devine d'après l'aspect de la courbe obtenue. Le miroir tournant nous montre une perle fixée à l'extrémité d'une tige horizontale dans une suite de perspectives différentes qui la font paraître comme un ruban lumineux; si alors la tige vibre perpendiculairement à ce ruban, la perle

Fig. 96.

monte et descend, et le sillon lumineux se transforme en une chaîne de replis serpentants; la courbe est tout à fait analogue à celle que forme le tracé graphique.

Lorsqu'on connaît déjà *a priori* la nature particulière d'un mouvement périodique, on peut tracer les courbes en question sans les avoir vues. Sur une ligne droite horizontale on marquera les secondes successives; à chaque division, on élèvera un cote verticale qui figure la hauteur où doit se trouver à ce moment le corps vibrant, lequel est censé monter et descendre; les extrémités des cotes forment la courbe de la vibration. C'est ainsi que la figure 96 représente le mouvement périodique d'un marteau-pilon que commande une roue hydraulique. Il s'élève d'abord lentement pour retom-

ber ensuite tout d'un coup; depuis la première seconde jusqu'à la neuvième il monte paresseusement, de la neuvième à la dixième il redescend par une chute très brusque. Le mouvement d'une corde attaquée par une

Fig. 97.

archet est tout à fait analogue. La figure 97 représente de la même manière les hauteurs où se trouve au bout de 1, 2, 3... unités de temps une bille élastique qui rebondit verticalement après avoir touché le sol. Un miroir tournant la montrerait décrivant cette courbe qui est formée d'arcades successives.

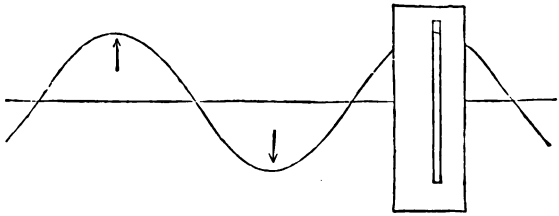


Fig. 98.

Le mouvement périodique le plus simple, ou le plus régulier, est celui d'un pendule. La courbe qui le représente a la forme sinueuse de la figure 98; c'est ainsi qu'un pendule terminé par une pointe tracerait ses oscillations sur une feuille de papier que l'on ferait glisser sous cette pointe : la ligne droite indique le sens

dans lequel marche le papier, les oscillations sont perpendiculaires à cette ligne, comme l'indiquent les flèches. Il est facile de reproduire à l'aide de cette courbe le mouvement pendulaire d'un point qui monte et descend; prenez un canif et une carte, pratiquez dans la carte une fente étroite et appliquez-la sur la courbe de manière que la fente soit verticale, puis faites-la marcher lentement de droite à gauche, vous ne verrez toujours qu'un point de la courbe, et il semblera osciller dans la fente comme un pendule véritable.

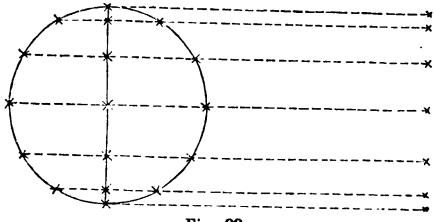


Fig. 99.

La loi du mouvement pendulaire peut en quelque sorte s'exprimer mathématiquement par une comparaison. Imaginons un point lumineux, par exemple une petite lanterne, attaché contre le bord d'une roue qui tourne avec une vitesse uniforme (fig. 99). En vous mettant de face, vous verrez donc le luminaire décrire un cercle parfaitement régulier. L'apparence ne sera pas la même pour un observateur placé de champ qui ne peut voir la roue que par sa tranche. S'il est un peu loin, il pourra la prendre pour un bâton vertical, et le point lumineux lui semblera monter et descendre le long de ce bâton; seulement, il lui fera l'effet de marcher beaucoup plus vite quand il sera à la hauteur de l'axe que lorsqu'il sera tout en haut ou tout en bas de

la roue; à ces deux instants, la petit
paraîtra s'arrêter momentanément avant de
arrière. Eh bien, ce mouvement apparent sera
exacte d'un mouvement pendulaire qui fera
le point lumineux le long du diamètre vertical de la roue.

On appelle *vibration pendulaire* un mouvement périodique caractérisé par les mêmes alternatives de lenteur et de vitesse : vitesse nulle aux deux extrémités de la course, croissante vers le milieu, où elle est maximum. Un *son simple* est produit par une vibration pendulaire. Le va-et-vient des branches du diapason ordinaire approche beaucoup de cette vibration-type ; le diapason donne une note à peu près simple, la flûte également.

Tous les sons simples sont excessivement doux et nous semblent plus graves qu'ils ne le sont en réalité. Leur timbre a quelque chose de sombre qui rappelle le timbre de la voyelle OU; il est indépendant de la matière du corps sonore. Nous verrons bientôt comment il faut faire pour produire un son simple ; dans la nature, c'est un oiseau rare que l'on ne rencontre presque jamais.

On ne rencontre dans la nature que des sons complexes, c'est-à-dire composés de plusieurs sons simples de hauteur diverses. Chaque corps qui résonne librement est à lui seul un petit orchestre. Le son le plus grave donne le ton, les autres, tous plus aigus les uns que les autres, accompagnent en sourdine. C'est cela qui fait le timbre. Un timbre riche est un nid de sons harmonieux dont le gazouillement nous plaît sans que nous sachions pourquoi.

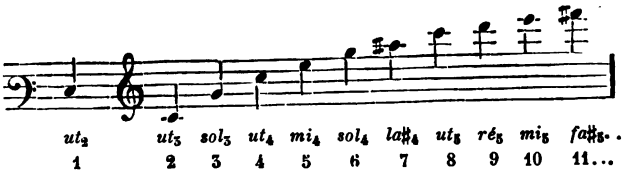
Il était connu depuis fort longtemps que beaucoup de corps rendent, en même temps que leur son fonda-

mental, quelques autres sons plus faibles, appelés *harmoniques;* mais on ne se rendait pas compte du rôle qu'il fallait leur attribuer. On ne se disait pas qu'ils sont la cause principale, sinon unique, du timbre qui caractérise les différents instruments, et que c'est leur intervention qui explique les formes diverses des courbes vibratoires.

Sauveur [1] a donné le nom d'*harmoniques* d'un son fondamental aux sons qui font 2, 3, 4, 5... vibrations pendant que l'autre n'en fait qu'une. Ensemble, ils forment donc la série naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, 5... Le premier harmonique est l'octave du son fondamental, le second, la douzième ou octave de la quinte; ceux qui suivent sont : la double octave, la dix-septième ou double octave de la tierce ; la dix-neuvième ou double octave de la quinte, etc.

Afin de rappeler toujours les rapports de hauteur des harmoniques par leur désignation même, nous y comprendrons le son fondamental, qui sera l'harmonique 1; l'octave sera l'harmonique 2, la douzième l'harmonique 3 et ainsi de suite.

En prenant l'ut_2 pour son fondamental, nous avons la série que voici :



On voit qu'en dépit de leur nom ces notes sont loin de former toujours entre elles des accords consonants.

1. Sauveur, qui a été l'un des fondateurs de l'acoustique, fut muet jusqu'à l'âge de cinq ans et resta toute sa vie presque sourd.

Cela n'est vrai que pour les six premières ; 7 et 11, représentées approximativement par *la* ♯ et *fa* ♯, n'appartiennent même pas à l'échelle musicale, ce sont des notes dissonantes, aussi bien que 9, qui est un *ré*. Quand ces notes se font sentir dans un son composé, elles en altèrent la beauté et lui donnent quelque chose de strident.

Sauveur avait très bien observé le phénomène des sons harmoniques ou de la *résonnance multiple* dès 1700. « Une corde de clavecin étant pincée, dit-il, outre le son fondamental, on entend encore en même temps, quand on a l'oreille fine et exercée, d'autres sons plus aigus que celui de la corde entière, produits par quelques-unes de ses parties, qui se détachent en quelque sorte de la vibration générale pour faire des vibrations particulières. Cette complication des vibrations se peut concevoir par l'exemple d'une corde attachée par les deux bouts et lâche, comme celle des danseurs. Car tandis que le danseur de corde lui donne un grand branle, il peut avec ses deux mains donner deux branles particuliers aux deux moitiés...

« Aussi chaque moitié, chaque tiers, chaque quart d'une corde a ses vibrations à part tandis que se fait la vibration de la corde entière. C'est la même chose d'une cloche quand elle est fort bonne et harmonieuse... »

Après avoir énuméré les harmoniques successifs qui accompagnent le son fondamental d'une corde sonore, Sauveur ajoute :

« Il paraît donc que toutes les fois que la nature fait par elle-même, pour ainsi dire, un système de musique, elle n'y emploie que cette espèce de sons, et cependant ils étaient demeurés jusqu'à présent inconnus à la

théorie des musiciens. Quand on les entendait, on les traitait de bizarres et d'irréguliers, et l'on se dispensait par là de faire une brèche au système imparfait et borné qui était en règne. »

Rameau reprit vingt-cinq ans plus tard ces idées et en fit la base d'un nouveau système musical.

Le son fondamental et ses harmoniques, pris isolément, sont des sons simples à vibrations pendulaires.

Fig. 100. Son fondamental et octave.

Leur mélange constitue un son complexe dont les vibrations ont une forme plus ou moins compliquée. Chacune de ces vibrations successives se compose : 1° d'une vibration du son fondamental ; 2° de deux vibrations de l'octave ; 3° de trois de la douzième ; 4° de quatre de la double octave, et ainsi de suite. La forme générale de la courbe qui représente cette vibration composée est déterminée par le son fondamental, mais les harmoniques en font osciller le contour en y produisant des dépressions et des renflements. Dans la figure 100, le pointillé représente la courbe du son fondamental, et le trait blanc la courbe qui résulte de l'adjonction de l'octave. C'est une courbe de ce genre qui

caractérise le timbre d'un son complexe ;
de forme suivant l'intensité relative des h
mais le nombre des grands replis ou pério
jours le même, et c'est ce qui fait que la
son mélangé est celle du son fondamental.

Inversement, une vibration périodique, de forme quelconque, peut toujours être décomposée en une série de vibrations harmoniques simples de la forme pendulaire. En d'autres termes, tout son complexe, de hauteur définie, peut se résoudre en une série harmonique de sons simples, commençant par un son fondamental de même hauteur que le son complexe. C'est un théorème de Fourier, un des plus féconds que connaisse l'analyse ; mais nous devons nous borner à l'énoncer ici. Il en résulte que, si le timbre dépend de la forme des vibrations, cette forme dépend á son tour des harmoniques, de sorte qu'en définitive le timbre naît de la superposition de sons simples. Ce n'est point là une fiction mathématique, une définition subtile dénuée de toute réalité physique : l'expérience confirme ces déductions de la manière la plus frappante.

Pour bien comprendre ce que c'est qu'un mouvement composé, reportons-nous encore une fois aux ondulations d'une surface liquide. L'eau est agitée par deux pierres tombées en deux endroits différents ; il y a donc deux centres d'ébranlement d'où se propagent deux systèmes de bourrelets circulaires et concentriques qui finiront par se rencontrer et se pénétrer, mais que l'œil pourra suivre encore après leur rencontre. C'est surtout au bord de la mer qu'il est facile de faire des observations de ce genre. Les lames qui arrivent du large et qui se reconnaissent à leurs crêtes couronnées d'une écume blanchâtre, atterrissent dans une succes-

sion fort régulière ; réfléchies dans plusieurs directions suivant la configuration de la côte, elles reviennent en arrière et s'entre-croisent obliquement en tout sens. Un bateau à vapeur qui passe laisse derrière lui deux traînées divergentes de vagues tumultueuses ; un oiseau de proie, qui plonge pour attraper un poisson, fait naître une suite de petites ondes circulaires qui cheminent à travers cette confusion générale. Il est rare qu'un observateur attentif ne puisse débrouiller et suivre dans ce pêle-mêle chaotique les divers mouvements partiels qui offrent chacun une direction et une forme particulières.

De même, l'oreille distingue parfaitement les différents mouvements sonores qui lui sont à la fois transmis par l'air. Transportons-nous par la pensée au milieu d'un bal, au moment où l'orchestre fait résonner une joyeuse fanfare. Quel mélange de sons qui cependant se distinguent encore avec plus ou moins de netteté ! Des cordes de la basse et des bouches des hommes partent des ondes sonores d'une longueur de trois à quatre mètres ; des lèvres roses des femmes s'élancent des ondulations plus courtes et plus rapides ; le froufrou soyeux des robes et le bruit des pas produisent de petits tourbillons d'ondes fines et serrées, et tout cela se pénètre et se mélange sans se confondre, puisque l'oreille distingue aisément les notes d'origine diverse. Cependant le conduit auditif, qui reçoit toutes ces impressions à la fois, n'est qu'un point en comparaison de la masse d'air de la salle où se croisent tous ces mouvements vibratoires. L'oreille ne peut suivre les ondes sonores dans tout leur parcours comme l'œil qui observe l'agitation d'une nappe liquide.

Si l'on jette une pierre dans une eau déjà agitée par

des ondulations d'une certaine ampleur, on verra de petits cercles concentriques se propager sur la surface ondulée comme ils se propageaient sur l'eau tranquille. Au moment où le bourrelet circulaire coïncide avec la crête d'une des grandes ondes, la hauteur de cette onde se trouve subitement augmentée de la hauteur du bourrelet ; de même, la dépression circulaire, en s'ajoutant momentanément à la dépression qui existe entre deux ondes, aura pour effet de creuser cette dernière davantage. Au contraire, une dépression se rencontrant avec une élévation, il y aura affaiblissement de l'effet principal. Ainsi l'addition des ondes plus petites aux grandes y produit simplement des bosses ou des creux, et, à moins d'embrasser d'un coup d'œil l'ensemble de ces petites bosses dans leur distribution circulaire, on peut perdre de vue les ondes excitées par la pierre et ne plus voir que les grandes ondes un peu modifiées dans leur contour extérieur. C'est ainsi que l'oreille ne distingue pas toujours une note faible qui en accompagne une autre beaucoup plus forte ; il nous semble n'entendre que cette dernière, elle prend seulement un timbre spécial.

La séparation des notes élémentaires qui se trouvent associées dans un son naturel ou dans un bruit quelconque, peut néanmoins toujours être effectuée par l'oreille avec le secours des résonateurs que nous avons déjà décrits. On a vu que ces globes renforcent chacun une note particulière dont ils ont été constitués les gardiens ; ils lui répondent, lui font écho, la retirent pour ainsi dire de la bagarre. Avec une série de résonateurs façonnés chacun pour une note spéciale, il est donc facile de mettre ces notes en évidence pour peu qu'elles existent dans un mélange quelconque. On

démontre ainsi aisément que les harmoniques des sons musicaux, bien loin d'être une illusion de l'ouïe, un phénomène tout subjectif, ont une existence parfaitement réelle. Avec un peu d'habitude, on arrive d'ailleurs à les discerner par l'oreille seule.

Une fois accoutumée à écouter, l'oreille écoute presque à notre insu. Ainsi, quand on entendra un tambour à peu de distance, on remarquera d'abord un son grave et sourd, qui est celui de l'air emprisonné dans la caisse; puis une série de notes aiguës, plus claires et plus nettes que produit la peau tendue sur le cadre. D'autres notes stridentes, mais de courte durée, sont dues au fouettement des cordes sur la membrane inférieure, enfin les parois de la caisse font entendre un tintement métallique.

La voix humaine est très riche en harmoniques, elle prend des timbres extrêmement complexes. Avec les résonateurs, on peut constater jusqu'à 16 harmoniques dans une voix de basse qui chante un A ou un E sur une note très grave. Rameau n'ignorait pas ce phénomène, et beaucoup de musiciens l'ont observé depuis. Ainsi Seiler raconte qu'en écoutant, pendant des nuits sans sommeil, la voix du veilleur qui annonçait les heures aux bourgeois de Leipzig, il lui sembla souvent entendre d'abord la douzième d'une note et ensuite cette note elle-même. M. Garcia dit qu'en écoutant sa voix, dans le silence de la nuit, sur le Pont-Neuf, il a souvent pu distinguer l'octave et la douzième de la note qu'il donnait. Si nous nous apercevons si rarement de l'existence de ces notes parasites dans les sons de la voix, c'est que nous n'y songeons pas d'ordinaire. Mais voici comment on peut s'assurer de ce fait. Que l'on prie un chanteur de tenir un O sur le

mi ♭, inférieur de la basse, et qu'on fasse résonner faiblement sur le piano le *si* ♭ de l'octave moyenne afin de fixer l'attention sur cette note ; on continuera d'entendre le *si* ♭ après que le doigt aura quitté la touche et que la corde aura, par conséquent, cessé de vibrer. C'est que le *si* ♭ résonnant dans le *mi* ♭ de la voix remplacera le son de la corde. Si l'on veut de cette façon entendre le *sol* de l'octave suivante, ou la dix-septième du *mi* ♭, il vaut mieux choisir la voyelle A.

Une circonstance qui mérite d'être rappelée ici, c'est que les notes depuis mi_6 jusqu'à sol_6, qui appartiennent à la dernière octave du piano, sont toujours enflées d'une manière toute spéciale par la résonance du conduit auditif; elles acquièrent ainsi une intensité factice qui donne quelque chose de perçant, de strident, aux sons qu'elles accompagnent à titre d'harmoniques. Pour une oreille très fine, la sensation devient douloureuse. Au reste, on sait que les chiens eux-mêmes sont sensibles à ces sortes d'impressions; leur ouïe est froissée par le *mi* suraigu du violon, il les fait hurler. Cette irritabilité de l'oreille à l'égard des notes très élevées la rend particulièrement sensible à ces dissonances désagréables qui nous frappent toujours dans les chœurs d'hommes, surtout quand ils forcent un peu les voix. On entend très réellement au-dessus des notes basses un charivari de petites notes criardes, étrangères à l'harmonie, qui accompagnent le chant comme un orchestre de grelots ou de cymbales.

Les cordes minces sont également très fécondes en harmoniques. Dans un fil d'acier très fin, M. Helmholtz en a observé jusqu'à dix-huit ; les harmoniques 7, 9, 11, 13, 14, 17, 18, sont tous plus ou moins dissonants; s'ils avaient plus d'intensité et de persistance, ils produiraient

une affreuse cacophonie. Heureusement l'oreille ne distingue ordinairement que les premières notes supérieures, qui sont consonantes avec la note fondamentale, encore faut-il beaucoup d'attention pour les saisir.

Il paraît établi, par tous ces faits, que toute vibration sonore qui offre un timbre particulier est décomposée par l'oreille en sons simples formant une suite harmonique. Cette conclusion peut à première vue paraître trop absolue et contraire au témoignage de nos sens, puisque d'habitude on ne se rend pas compte de l'existence de plusieurs notes dans un son musical. Tout au plus les musiciens distinguent-ils dans un accord les différentes notes qui le constituent, mais qui sont produites séparément. La difficulté semble encore augmenter quand on forme l'accord avec des intervalles composés tels que la douzième, réplique de la quinte, et la dix-septième, *triplique* de la tierce (comme l'appelle Sauveur), intervalles qui rentrent dans la suite harmonique. J'ai vu faire à M. Kœnig la jolie expérience que voici. Sur la boîte de résonance d'un énorme diapason qui résonne comme un bourdon, il groupe un orchestre de diapasons plus petits accordés pour donner les quatre ou cinq premiers harmoniques du grand. D'un vigoureux coup d'archet il fait parler d'abord le gros patriarche, puis tout son cortège : l'air se remplit d'un son grave et harmonieux, très plein, mais qui semble unique à une oreille peu exercée ; on ne distingue pas du tout les voix des diapasons aigus. Alors M. Kœnig étouffe subitement le plus grave en posant la main dessus : aussitôt, on entend les autres, qui continuent de vibrer ; leurs voix se résolvent, se séparent nettement dès qu'on supprime la basse fondamentale qui les soutenait et les liait en faisceau.

Ainsi, dans les circonstances ordinaires, l'oreille ne semble pas effectuer ce morcellement qui sépare le timbre en ses éléments constitutifs. Mais ceci est une erreur ; il ne s'agit que de nous entendre sur les mots. En effet, il faut distinguer ici entre la perception ou *sensation*, qui est complexe, et l'*impression* que reçoit l'esprit, qui est *une*. L'oreille perçoit bien réellement plusieurs notes quand le violon donne un *fa*, mais l'ensemble de ces notes n'éveille en nous que le souvenir d'un *fa* ayant un timbre particulier, le *fa* du violon ; nous n'avons aucun intérêt direct à analyser autrement notre impression. Le clavier de l'appareil auditif décompose le bruit complexe qui le frappe, mais la synthèse se refait dans le centre nerveux. La physiologie nous offre bien des exemples d'illusions tout à fait semblables. Ainsi, nous prenons pour des couleurs simples ces teintes que le prisme décompose en une infinité des nuances. La théorie de la vision binoculaire montre avec évidence que, pendant toute notre vie, nous voyons doubles tous les objets, à l'exception de ceux sur lesquels nous fixons le regard, et pourtant, pour nous en convaincre, il faut un grand effort d'attention. Peu de personnes savent qu'il existe dan la rétine un petit espace insensible, le *punctum cæcum* (point aveugle), et qu'en conséquence nous ne voyons pas dans une certaine direction, à peu près au centre du champ de la vision. Cette lacune est si grande, que sept disques lunaires rangés à la file y trouveraient place, et qu'à 2 mètres un visage humain y disparaît ; mais nous voyons toujours à côté. Quand Mariotte démontra ce fait par des expériences à la cour du roi Charles II d'Angleterre, il put s'amuser de la stupéfaction de ses illustres auditeurs. On cite des exemples bien avérés de personnes

qui n'ont découvert que par hasard qu'elles étaient borgnes depuis longtemps, c'est-à-dire affectées d'une cécité dont les caractères prouvaient qu'elle remontait déjà à plusieurs années. Telle est notre indifférence pour un phénomène qui nous accompagne sans cesse. Nous ne nous rendons pas plus compte de la nature complexe d'un son musical que nous ne nous apercevons de la duplicité de l'image d'un objet que nous regardons avec les deux yeux ; et c'est cependant cette duplicité qui produit l'impression du relief, comme le prouvent les effets du stéréoscope. Le timbre est le relief des sons.

Nous ne sommes faits qu'à distinguer entre eux les sons d'instruments différents, ou les voix de plusieurs personnes; et dans ces cas, pour nous aider nous avons encore en dehors du timbre une foule d'autres caractères distinctifs, par exemple les petits bruits qui précèdent ou suivent l'émission du son, sa durée, sa force, ses intermittences et ses variations. Mais pour ce qui est de décomposer le timbre et d'en avoir le sentiment, il faut que l'oreille ait été formée à cette tâche.

On appelle *fourniture* un jeu d'orgue formé de trois à sept tuyaux d'étain pour chaque note, qui sont accordés dans le rapport des consonances harmoniques. Les tuyaux de chaque note sont à l'octave ou à la quinte les uns des autres ; quelques organiers y font entrer la tierce, surtout ceux d'Italie, qui l'emploient toujours dans leur *ripieno*. Cet assemblage de petits tuyaux résonnant avec les grands et confondant leur son de manière à ne plus produire qu'une sensation indécise, est pour l'ensemble une sorte d'assaisonnement, comme le cerfeuil, l'estragon, la pimprenelle, dont la réunion se nomme aussi *fourniture*, le sont pour la salade.

En ajoutant la fourniture aux jeux de fond on obtient le plein jeu. Cet effet donne une idée très juste de la nature du timbre.

M. Helmholtz a corroboré ces déductions en composant artificiellement des timbres divers avec les notes qu'ils étaient censés contenir. Voici une expérience que tout le monde peut faire sans difficulté. On soulève les étouffoirs d'un piano de manière à rendre à toutes les cordes leur liberté, et l'on chante fortement sur la voyelle A une note quelconque à proximité de la table d'harmonie de l'instrument. Le résonnement des cordes reproduit alors distinctement un A; la ressemblance est beaucoup moins franche lorsqu'on ne soulève que l'étouffoir de la corde dont on veut donner la note. C'est que la voyelle A est caractérisée par un timbre particulier, qui dépend de certaines notes aiguës; les cordes qui correspondent à ces notes résonnent par communication, et leur intervention imprime à l'écho de la voix le timbre que celle-ci avait pris en chantant sur l'A. On peut imiter de la même manière le timbre de la clarinette, celui du cor, etc.

La hauteur d'un son musical est donc toujours celle de la note qui domine dans le mélange harmonique, et cette note est généralement la plus grave de la série. Toutefois l'existence des sons supérieurs n'est pas tout à fait sans influence sur le jugement que l'on porte de la hauteur d'un son complexe; ils l'aiguisent, l'élèvent un peu dans l'échelle musicale. C'est pour cette raison que des musiciens même très exercés se trompent parfois d'octave en comparant des notes de timbre différent.

Nous avons déjà dit que, pour discerner des sons d'origine diverse, le jugement de l'oreille ne se fonde

pas seulement sur le timbre, mais qu'il s'éclaire de certains bruits accessoires. Dans beaucoup de cas, ces bruits caractéristiques ne se font entendre qu'au moment où le son prend naissance ou bien lorsqu'il s'éteint.

La manière dont se prépare l'émission du son forme un caractère tout aussi tranché que le timbre; pour la voix humaine, les bruits qui précèdent l'émission des voyelles sont si bien définis, qu'on les a désignés par une série de lettres : ce sont les consonnes explosives B, P, D, T, G, K. Elles donnent à la voyelle qui suit ou précède un caractère particulier qui n'a rien de commun avec son timbre.

La production un peu forcée des sons dans les instruments de cuivre, — ils semblent sortir par soubresauts, — fait encore distinguer les cuivres de la flûte, du hautbois, de la clarinette, abstraction faite du timbre proprement dit. Enfin, la rapidité plus ou moins grande avec laquelle le son fondamental et ses harmoniques s'éteignent constitue une différence sensible entre les cordes à boyau et les cordes métalliques, encore qu'elles soient frappées d'une manière identique. Les vibrations des premières étant peu soutenues, leur son a quelque chose de sec et de vide, ainsi qu'on le remarque dans le pizzicato du violon : les vibrations des cordes métalliques persistent plus longtemps, leur son est plein, mais moins pénétrant que celui des cordes légères.

Dans d'autres cas, le son est accompagné de bruits pendant toute sa durée. Ainsi, à côté du son des instruments à vent, on distingue toujours une sorte de sifflement ou de bruissement produit par le frottement de l'air qui se brise sur le biseau de l'embouchure. Le grincement des crins de l'archet s'entend toujours plus

ou moins distinctement pendant qu'on joue du violon. Ce sont des bruits de cette espèce que nous désignons par les lettres F, V, S, Z, J, L, R. Les deux dernières sont caractérisées par les intermittences que le frémissement de la langue produit dans l'émission de la voix. « L'R, — dit le maître de philosophie à M. Jourdain, — se prononce en portant le bout de la langue jusqu'au haut du palais : de sorte qu'étant frôlée par l'air qui sort avec force, elle lui cède et revient toujours au même endroit, faisant une manière de tremblement : R, RA.

« Jourdain. — R, R, RA. R, R, R, R, R, RA. Cela est vrai. Ah! l'habile homme que vous êtes, et que j'ai perdu de temps ! R, R, R, RA ».

Les voyelles mêmes sont constamment accompagnées de petits bruits qui nous aident à les deviner encore dans le chuchotement. Ces bruits se font entendre surtout avec I, U, OU ; s'ils sont plus accentués, l'I devient l'Y consonne, l'OU devient le W anglais. La voix parlée les produit plus distinctement que la voix chantée, qui fait ressortir, au contraire, le timbre ou la partie musicale de la voyelle, en l'articulant avec moins de netteté. Cette partie musicale se distingue encore à une distance où les bruits cessent d'être perçus. Voilà pourquoi les consonnes s'entendent moins loin que les voyelles. C'est aussi pour la même raison qu'une voix lointaine peut être confondue avec le cor anglais. Seules, les consonnes M et N participent de la nature des voyelles par leur mode de formation, où les bruits ne jouent qu'un rôle très secondaire. Si, par un temps calme, on écoute au pied d'une montagne des voix qui parlent à une certaine hauteur, on ne comprend guère d'autres mots que ceux qui sont formés avec M ou N, comme *maman*, *non*.

Voici maintenant ce qui peut se dire des timbres divers :

En premier lieu, il est toujours possible d'obtenir des sons simples, en renforçant le son fondamental d'un diapason par une boîte de résonance dont les notes supérieures ne concordent pas avec celles du diapason. Le timbre des sons simples est très doux et très sombre, trop peu brillant pour la musique.

Les sons accompagnés de notes supérieures non harmoniques, — il y en a de toutes les espèces, — ne rentrent pas dans notre définition du son musical : on ne peut en faire usage en musique que si les notes supérieures s'évanouissent assez vite pour qu'on puisse les négliger et ne tenir compte que de la note principale. Dans cette catégorie se rangent les verges et les plaques, les diapasons, les cloches, les membranes. Les diapasons ont des notes supérieures très élevées ; on les entend au moment où on frappe le métal. La première est située aux environs de la douzième du son fondamental. L'oreille sépare toujours ces notes aiguës et peu persistantes de la note principale ; elle n'a aucune tendance à les fondre ensemble, comme elle fond les éléments harmonieux d'un son musical.

La matière des tiges n'influe sur leur sonorité que par le degré de persistance des sons supérieurs. Dans le bois, ils s'éteignent beaucoup plus vite que dans les substances plus élastiques ; il s'ensuit que, s'il fallait absolument choisir entre le claque-bois et l'harmonica-tympanon, dont les éléments sont de petits bâtons de verre ou d'acier, on donnerait la préférence au claque-bois. Vers 1830, Gusikow donnait encore des concerts sur ce dernier instrument, dont l'origine est très ancienne.

Le son des cloches ordinaires ne saurait être qualifié de son musical ; mais il paraît qu'en façonnant convenablement les parois, les fondeurs parviennent à rendre harmoniques les premières notes supérieures d'une cloche, et alors elle possède un timbre satisfaisant. C'est ce qui explique l'effet agréable des carillons, qui sont surtout répandus dans les villes des Pays-Bas ; on en compte huit à Amsterdam, dont un composé de quarante-deux cloches qui forment trois octaves et demie (entre ut_2 et fa_5) ; le plus célèbre est celui de Gand. Paris en a un à Saint-Germain l'Auxerrois.

Le son fondamental des cloches s'abaisse quand on augmente leur diamètre ou leur poids. La plus grosse cloche du monde est celle qui a été fondue à Moscou en 1736 ; son poids est de 253,900 kilogrammes ; malheureusement le bord en a été brisé avant qu'on n'ait pu s'en servir. Il y en a encore une autre à Moscou qui pèse 111,000 kilogrammes et qui date de 1307. Les grands bourdons de nos cathédrales pèsent rarement plus de 10,000 kilogrammes ; celui de Notre-Dame de Paris, fondu en 1680, pèse 13,000 kilogrammes.

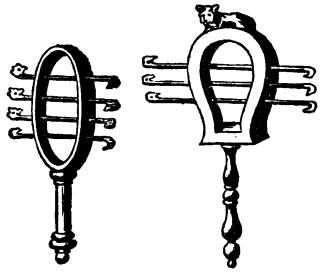


Fig. 101. Sistres des anciens.

L'harmonica de Franklin se compose de cloches en verre que l'on fait vibrer en promenant les doigts mouillés sur leurs bords ; les sons de cet instrument sont très pénétrants et irritent les nerfs, ce qui doit tenir à l'apparition d'harmoniques suraigus.

Les instruments à percussion, tels que timbres, tam-tams, grelots, sistres, clochettes, triangles et cymbales se rangent dans la même catégorie que les cloches et les diapasons. Ils ont des notes supérieures discordantes. Le *tam-tam* ou *gong* des Chinois est une plaque circulaire à bord relevé, en bronze trempé et écroui au marteau. On le frappe à petits coups précipités en allant de la circonférence au centre, et on entend alors des sons multiples qui éclatent comme par explosion avec des effets de sonorité vraiment étranges ; c'est comme s'il y avait dans le métal une meute de sons faisant des efforts désespérés pour briser les barres de sa prison. Les feuilles de tôle avec lesquelles on imite dans les théâtres le bruit du tonnerre produisent des effets qui ont une certaine analogie avec ceux du tam-tam.

Les peaux du tambour, de la grosse caisse, des timbales, ne rendent pas non plus des sons musicaux, mais la résonance de la caisse étouffe jusqu'à un certain point les notes supérieures qui accompagnent le son fondamental. Toutes ces machines à bruit ne s'emploient que pour mieux marquer la mesure ; ce sont les instruments favoris des sauvages. Il n'y a pas de peuple sur la terre qui n'ait inventé un tambour pour battre la mesure et pour animer les danseurs. On en trouve chez les Esquimaux, chez les Patagons, les Hottentots et les Néo-Zélandais. Un pot de terre, un morceau de bois creux, une calebasse, avec une peau d'âne, de crocodile ou de requin, forment les éléments de ces grossières boîtes de résonance. Le tambour de basque et les castagnettes, dont les peuples du Midi font un si gracieux usage pour marquer le rythme de leurs danses, sont d'origine très ancienne. Le *crotalon* des bacchantes n'est pas autre chose.

Les cordes et les tuyaux forment la véritable matière première des instruments de musique ; leur timbre est constitué harmoniquement. Une corde homogène, qui vibre en totalité, rend le son fondamental et la série 2, 3, 4... de ses harmoniques ; mais l'on peut aussi la faire vibrer de manière qu'elle rende seulement un des harmoniques en se divisant en des ventres séparés par des nœuds.

Le timbre des cordes varie suivant qu'elles sont pincées, comme celles de la harpe; frappées avec un marteau, comme dans le piano; attaquées avec l'archet, comme dans le violon, ou agitées par le vent, comme dans la harpe éolienne.

Dans la construction des pianos, l'expérience de deux siècles a conduit à une foule de règles empiriques qui se trouvent aujourd'hui justifiées par la théorie. Ainsi le marteau frappe au septième ou au neuvième de la longueur des cordes moyennes, et le choix de cette place a été déterminé par le timbre qui en résulte; or la théorie fait voir que l'on supprime par cet artifice les harmoniques 7 et 9, les premiers qui soient en dissonance avec le son fondamental[1]. Le temps pendant lequel le marteau reste en contact avec la corde influe également sur le timbre ; c'est cette considération qui peut guider le choix des marteaux.

Les cordes à boyau ont des harmoniques très élevées, mais aussi très peu persistants, ce qui en corrige l'influence nuisible. Dans le violon, leur timbre est légèrement modifié par la résonance de la caisse, dont le son propre est d'ordinaire l'ut_3. Les premiers harmo-

1. Quelques fabricants ont cependant renoncé à s'astreindre à cette règle.

niques sont moins prononcés dans le timbre du violon que dans celui du piano ; les harmoniques aigus sont, au contraire, plus accentués dans le violon.

Les *tuyaux ouverts* se comportent de la même manière que les cordes : ils ont un son fondamental dont le timbre comprend la série naturelle des notes 1, 2, 3, 4, 5.... et on peut faire disparaître le son fondamental et n'obtenir qu'un harmonique en forçant le vent. Dans les *tuyaux fermés*, les harmoniques d'ordre pair manquent ; ils rendent seulement les notes 1, 3, 5, 7....

Fig. 102.

Un tuyau fermé a toujours le même son fondamental qu'un tuyau ouvert de longueur double ; on peut s'en assurer en enfonçant un tiroir au milieu d'un tuyau ouvert (fig. 102) ; on le change ainsi en tuyau fermé de longueur moitié, mais le son reste toujours le même. Enfin, dernière loi qui explique la dénomination des registres de l'orgue, la hauteur du son fondamental est en raison inverse de la longueur des tuyaux. Un tuyau de seize pieds, ouvert, donne l'octave grave du tuyau de huit pieds ouvert, mais il est à l'unisson du tuyau de huit pieds fermé ; le tuyau de huit pieds ouvert est à l'octave grave du tuyau de quatre pieds ouvert et à l'unisson du tuyau de quatre pieds bouché, et ainsi de suite.

Dans les jeux d'orgue, on emploie autant de tuyaux qu'il y a de notes à produire ; chacun ne donne que sa note fondamentale. Mais dans les instruments où l'on souffle par la bouche, on a recours à divers artifices pour tirer du même tuyau toutes les notes de la

gamme. Ainsi, le *cor* est fait d'un tube de cuivre très long, contourné sur lui-même; on n'en tire que les harmoniques 8, 9, 10..., qui donnent la gamme naturelle si on en modifie quelques-uns, ce qui s'obtient en introduisant le poing dans le pavillon. Dans le *trombone*, on fait varier la longueur du tuyau par une coulisse; dans le *cornet à piston*, par des tubes supplémentaires que le jeu des pistons intercale dans le circuit total. Dans d'autres instruments, comme la flûte, la clarinette, etc., le tuyau sonore est percé de trous que les clefs permettent de fermer et d'ouvrir. La colonne d'air du tube est forcée de vibrer de manière qu'il y ait des ventres en regard des orifices ouverts, et il en résulte que ces orifices produisent le même effet que si le tuyau était coupé aux endroits où ils sont situés. Grâce à ce mécanisme, le musicien a donc dans sa main toute une série de tuyaux de longueurs différentes, et il peut en tirer les sons les plus variés.

Fig. 103.

Dans tous les instruments à vent, une des parties les plus importantes est *l'embouchure*. La plus simple est celle des tuyaux à bouche, comme la flûte et la plupart des tuyaux d'orgue; elle est représentée par le *sifflet* (fig. 103), qui est une simple embouchure sans tuyau; le vent vient frapper sur la *lèvre* de la bouche avec un bruissement que l'on peut considérer comme un mélange de sons faibles. La colonne d'air du tuyau en renforce quelques-uns par voie de résonance élective, ce sont les harmoniques que le tuyau peut rendre.

Dans les *embouchures à anche*, le jet d'air envoyé par un soufflet ou par les poumons fait d'abord vibrer

une languette métallique qui l'interrompt périodiquement ; ce trémolo de la languette donne naissance à une gerbe de notes parmi lesquelles la colonne d'air du tuyau fait encore son choix ; mais le son n'est pas le même que lorsqu'on fait parler le tuyau par une embouchure ordinaire. A cette catégorie appartiennent les tuyaux d'orgue à anche, l'orgue expressif, la clarinette, le hautbois, le basson, le cor anglais.

Les lèvres humaines fonctionnent comme anches membraneuses quand on embouche le cor, le trombone, l'ophicléide. L'influence de leur disposition et de leur tension se réduit à favoriser plutôt tel que tel autre harmonique du tube de l'instrument.

Dans la production de la voix, ce sont les *cordes vocales* qui jouent le rôle d'anches membraneuses, mais leur mode d'action est tout autre que celui des lèvres : elles déterminent *directement* la hauteur de la note sur laquelle on parle ou chante. Dans la clarinette ou le cor, la note dépendait toujours du volume d'air confiné dans le tuyau sonore ; ici, au contraire, elle ne dépend que de la tension de l'anche, c'est-à-dire des cordes vocales, et nullement de la masse d'air que renferme la cavité buccale ; sa hauteur est donnée uniquement par les vibrations des ligaments.

Toutefois cette résonance buccale devient très importante à un autre point de vue. Elle modifie le timbre de la voix en y favorisant tel ou tel harmonique.

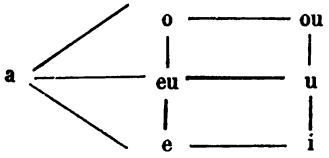
C'est là l'origine des voyelles.

Une voyelle n'est autre chose que le timbre particulier que prend une note quelconque si la résonance de la bouche renforce, parmi les harmoniques de cette note, celui qui se rapproche le plus d'une certaine notre *fixe*. Ainsi, par exemple, la voyelle A est produite par

la résonance du *si* ♭₄. Pour articuler un A, la bouche se dispose de manière à faire sonner le si ♭₄ et, quelle que soit alors la note fondamentale du son que nous émettons, c'est toujours l'harmonique le plus rapproché du si♭₄ qui sera mis en relief.

En portant successivement devant la bouche, ouverte pour articuler telle voyelle, une série de diapasons de plus en plus élevés, on en trouve un qui est particulièrement renforcé; sa note est celle qui répond au son propre du volume d'air confiné dans la bouche. M. Helmholtz a constaté de cette manière que chaque voyelle est caractérisée par une ou par deux notes toujours ses mêmes; seulement, ces notes spécifiques se modifient selon l'accent avec lequel on parle.

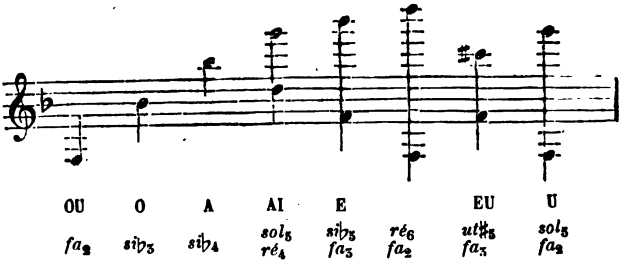
On comprend qu'il doit en être ainsi. La définition des voyelles par cinq lettres de l'alphabet est tout à fait insuffisante; le nombre en est pour ainsi dire illimité si l'on veut tenir compte des nuances de la prononciation. Il faudrait en distinguer au moins sept principales qui se groupent comme il suit :



Dès lors, si une voyelle est définie par sa note spécifique, cette note devra varier avec l'idiome auquel on emprunte la voyelle. Aussi les notes déterminées par M. Helmholtz pour les voyelles allemandes diffèrent-elles de celles que M. Donders attribue aux mêmes voyelles prononcées à la hollandaise.

Les voyelles A, O, OU, n'ont toujours qu'une seule

note spécifique ; mais pour les autres on trouve *deux* sons de plus forte résonance ; et cette duplicité s'explique si on réfléchit que la bouche prend alors la forme d'une bouteille dont le ventre est le fond de la bouche, le goulot étant représenté par la langue et les lèvres. Ces deux cavités vibrent séparément. Voici les notes qui, d'après M. Helmholtz, répondent aux différentes voyelles prononcées avec l'accent de l'Allemagne du Nord.



D'après M. Kœnig, les voyelles OU, O, A, E, I sont caractérisées par les notes $si\flat_2$, $si\flat_3$, $si\flat_4$, $si\flat_5$, $si\flat_6$, qui embrassent ainsi quatre octaves.

L'intensité des sons partiels d'une voyelle ne dépend donc pas du rang qu'ils occupent dans la série harmonique, mais seulement de leur hauteur absolue ; et c'est là ce qui distingue le timbre des voyelles de celui des instruments de musique. Prenons, par exemple, une flûte ; quelle que soit la note qu'elle donne, c'est toujours l'octave qui résonne en même temps. Mais si l'on chante A sur une note quelconque, on ne peut pas prévoir, en général, quel harmonique sera renforcé ; tantôt ce sera l'octave, tantôt la douzième ou la dix-septième ou quelque autre terme de la série harmonique. Ainsi, quand la note sur laquelle on chante A est le

mi$_3$, ce sera l'octave qui sera enflée, car la note spécifique de la voyelle A est l'octave du *si*b_3. Mais si la note fondamentale est le *fa* ♯, on entendra surtout le neuvième harmonique *la* ♯$_4$, qui est le plus voisin du *si*b_4. Il y a là une vague analogie avec le violon, où la caisse renforce toutes les notes voisines de l'*ut*$_3$, son propre de la masse d'air emprisonnée.

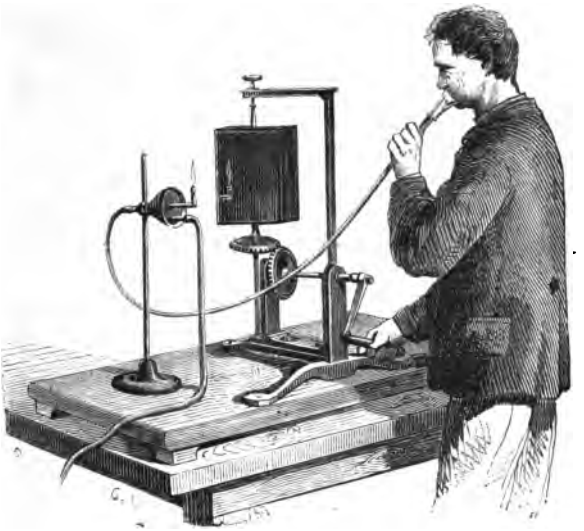


Fig. 104. Voyelles observées à l'aide des flammes de Kœnig.

Au reste, cette théorie des voyelles est loin d'être complète ou absolument satisfaisante, comme l'a fait voir Grassmann dans un travail récent. La question des consonnes est encore plus obscure. M. Oscar Wolf et Mme Seiler soutiennent que toutes les consonnes, à l'exception de cinq (H, L, M, N, W) ont leurs notes propres comme les voyelles, et doivent en conséquence

être considérées comme des demi-voyelles. Ces notes de résonance des consones varient un peu selon le ton de la voix. D'après Mme Seiler [1], les notes des consonnes

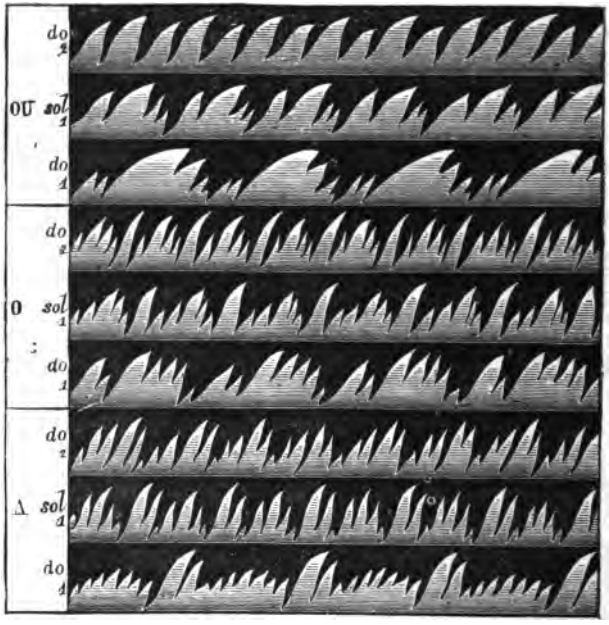


Fig. 105. — Timbre des voyelles.

B, P seraient respectivement un *mi* de 640 et un *fa* de 692 vibrations; celles de G, K un *ré* de 1152 et un *mi♭* de 1232 vibr.; celle de la sifflante S un *si*, de 7400 vibrations, ou même une note encore plus élevée, tandis que pour l'R on a trouvé une note très

1. *The voice in speaking*, Philadelphia, 1875. — *The voice in singing*, *ib.*, 1875.

grave (128 ou 145 vibrations, selon la manière dont on forme cette consonne). C'est un bond de six octaves.

M. Kœnig obtient une image visible du timbre des

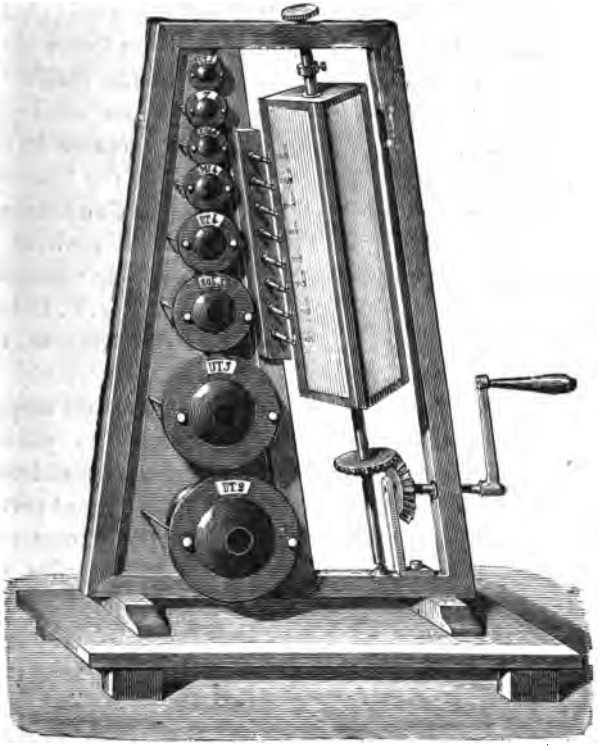


Fig. 106. Appareil de Kœnig pour l'analyse du timbre.

voyelles au moyen de ses flammes, sur lesquelles il fait agir directement la voix par un tube de caoutchouc muni d'un pavillon (fig. 104). Elles sont alimentées par un courant de gaz qui traverse une capsule creuse, fer-

mée d'un côté par une membrane que la voix fait vibrer. Cette membrane agit sur la flamme comme un soufflet qui la ferait tour à tour flamber et pâlir. Si les secousses sont trop violentes et la flamme petite, elle s'éteint ; si elle résiste, elle s'effile et bleuit. Une flamme qui palpite ainsi paraît dans le miroir tournant sous la forme d'un ruban dentelé dont l'apparence changeante révèle le nombre et la force relative des harmoniques, ainsi que le montre la figure 105. La figure 106 représente un assemblage de résonateurs combinés avec des flammes qui permettent d'observer les harmoniques d'un son dont la note fondamentale est l'ut_2. On peut ainsi analyser le timbre de la voix ou celui d'un instrument de musique.

Après avoir accompli l'analyse des timbres, M. Helmholtz a songé à les reproduire par voix de synthèse, en réunissant les notes que l'analyse y avait décelées. Il a fait construire une série harmonique de huit diapasons qui furent montés entre les branches d'un système d'électro-aimants, de manière à pouvoir être maintenus indéfiniment en vibration par le jeu d'un courant périodique. En avant de chaque diapason était disposée une boîte de résonance qu'on pouvait fermer plus ou moins complètement en appuyant sur les touches d'un clavier; la boîte fermée, le diapason ne rend qu'un son à peine perceptible, mais ce son devient de plus en plus fort à mesure qu'on découvre l'orifice de la boîte. Avec cet appareil, on produit par exemple un O très distinct en faisant résonner fortement le $si\flat_3$, plus faiblement $si\flat_2$, et fa_4. On obtient un A en donnant avec une intensité modérée $si\flat_2$, $si\flat_3$, fa_4, et avec force $si\flat_4$ et $ré_5$. Le diapason fondamental $si\flat_2$ donne, en résonnant seul, un OU très sombre.

M. Kœnig a construit le même appareil avec dix dia-

pasons. Les voyelles se distinguent surtout par le contraste lorsqu'on passe alternativement de l'une à l'autre. Toutefois, il faut dire que pour les voyelles d'un timbre clair, la ressemblance est en général discutable.

Comment concevoir la merveilleuse faculté que possède l'oreille de décomposer en vibrations simples des sons si complexes? On a vu que les cordes d'un piano effectuent cette dissociation des harmoniques, puisqu'elles répondent à toutes les notes du mélange qui se trouvent à leur unisson. Imaginons une série de cordes parcourant toute la gamme des notes possibles, et nous aurons de quoi reproduire fidèlement toutes les variétés de timbres ou de sons composés.

M. Helmholtz pense qu'il existe dans l'oreille un système de cordes de cette nature. Il avait d'abord assigné ce rôle aux *fibres de Corti*, dont la membrane intérieure du limaçon se trouve tapissée et qui peuvent être considérées comme les terminaisons du nerf auditif. Le nombre en dépasse trois mille ; en supposant chacune de ces fibres accordée pour une note particulière, on avait là un clavier de trois mille cordes. Mais cette hypothèse, sur laquelle nous reviendrons en parlant de l'oreille, a dû être abandonnée ; M. Helmholtz attribue maintenant aux fibres de la membrane basilaire la fonction que les arcs de Corti ne paraissent pas pouvoir remplir.

On pourrait de la même manière expliquer la perception des couleurs par l'existence de fibres du nerf optique accordées chacune pour une couleur simple. C'est là l'hypothèse émise par Thomas Young. On ne saurait nier que, grâce à cette théorie ingénieuse, tous les phénomènes de la perception des couleurs et des sons s'expliquent d'une manière fort naturelle. On com-

prend maintenant que l'organe de l'ouïe doit fonctionner comme un véritable prisme qui décompose le timbre en ses éléments, quoique la sensation complexe qui arrive au cerveau soit rarement analysée par l'esprit, habitué à ne juger que de l'ensemble de ses impressions.

Les qualités de timbre les plus agréables à l'oreille et qui conviennent à la musique, contiennent, avec une intensité modérée, les harmoniques depuis 1 jusqu'à 6. Comparés aux sons simples, les sons musicaux ont quelque chose de plus riche, de plus magnifique, de plus coloré; ils paraissent d'ailleurs très suaves tant que les notes supérieures plus aiguës ne viennent pas troubler l'harmonie. C'est à cette catégorie qu'appartiennent les sons du piano, ceux des tuyaux d'orgue ouverts, et aussi les sons de la voix humaine et ceux du cor, s'ils ne sont pas forcés. Les flûtes se rapprochent, au contraire, du timbre des sons simples. Avec les sons de cette espèce, on ne fait que de la musique *grise*; il faut qu'ils soient soutenus par d'autres sons. Un harmonium composé de diapasons, qui rendent également des sons presque simples, ne pourrait guère être employé seul.

Les tuyaux d'orgue *larges* ne renforcent que très peu les harmoniques du son fondamental et donnent, par conséquent, des sons à peu près simples. Cette remarque s'applique surtout aux tuyaux fermés.

Quand le son ne contient de la série harmonique que les termes de rang impair (le son fondamental, la douzième, etc.), ainsi que cela a lieu pour les tuyaux d'orgue étroits et fermés, pour la clarinette, pour les cordes frappées au milieu de la longueur, le timbre devient *creux*; il devient *nasillard* si le nombre des sons supé-

rieurs augmente. Quand le son fondamental domine, le timbre est *plein;* il est *vide* quand le son fondamental est comparativement trop faible. Le son d'une corde est moins plein lorsqu'on la pince avec les doigts que lorsqu'elle est frappée avec un marteau.

Quand les harmoniques au-dessus de 6 sont très distincts, le son devient déjà strident ou rauque, à cause des dissonances auxquelles donnent lieu les notes supérieures de cette région . Toutefois, lorsqu'elles n'ont pas trop d'intensité, elles ne nuisent pas à l'effet d'ensemble; elles peuvent même contribuer à donner de l'éclat et de la couleur au son d'un instrument. C'est ce que l'on constate aisément pour les sons de la voix humaine, du violon, du hautbois, des instruments de cuivre.

Le timbre, élément subtil et changeant dont nous venons de faire en quelque sorte l'anatomie, joue un rôle capital dans les rapports de la voix avec l'âme. C'est le timbre qu'elle a qui rend une voix sympathique, persuasive, caressante, ou bien provocatrice, agaçante, désagréable.

XII

INTERFÉRENCES

Battements. — Sons résultants. — Tonomètres de Scheibler et de Kœnig. — Influence du mouvement de la source.

Si paradoxe que cela puisse paraître, dans ce chapitre nous verrons les sons se battre, et, lorsqu'ils sont de même force, se détruire et faire place au silence. Les phénomènes de la résonance nous laissaient entrevoir parmi les sons comme des liens de sympathie réciproque : les cordes d'un violon accroché au mur chantent toutes seules dès qu'on essaye un autre violon dans la même chambre ; tout corps sonore héberge, en général, une famille de notes pouvant répondre d'elles-mêmes à la note amie qui les sollicite. A présent, nous allons étudier la guerre des sons, connaître leurs inimitiés et leurs discordes.

On dit que deux notes *battent* quand leur réunion donne lieu à des intermittences ou alternatives périodiques de force et de faiblesse. Le phénomène est bien connu pour les tuyaux d'orgue. Lorsqu'on fait résonner ensemble deux tuyaux légèrement désaccordés, ils se

troublent et donnent des *battements;* le son tantôt s'enfle, tantôt diminue, et quand les coups de force sont très rapprochés, cela devient un petit vacarme, une sorte de roulement prolongé.

C'est encore Sauveur qui a étudié le premier ce bizarre phénomène, et il en a tiré immédiatement une application des plus importantes[1]. Il avait conclu de ses expériences que le nombre des battements est toujours *égal à la différence de hauteur* des deux notes : pour chaque vibration double que l'une fait de moins que l'autre, il y a un battement. Dès lors, rien de plus facile que de déterminer la hauteur absolue de deux notes en comptant leurs battements. Supposons, par exemple, que deux tuyaux soient accordés pour les notes *ut* et *ré;* l'intervalle étant d'un ton majeur, le premier fera toujours 8 vibrations quand l'autre en fera 9 ; la différence étant 1, il y aura toujours 1 battement pour 8 vibrations de l'un et 9 de l'autre. Si maintenant on a compté 4 battements par seconde, on en conclura que dans une seconde le premier tuyau a fait 4 fois 8 et l'autre 4 fois 9 vibrations, soit 32 et 36, et l'on en connaîtra ainsi la hauteur absolue.

Sauveur voulut répéter ces expériences devant une commission de l'Académie. Il les avait déjà fait voir à plusieurs musiciens de Paris, et elles avaient toujours réussi d'une manière très heureuse. Il faut que la commission ait eu le mauvais œil : rien ne voulut marcher. « La difficulté de recommencer l'expérience, l'appareil qu'il faut pour cela, d'autres occupations plus pressantes de M. Sauveur, dit Fontenelle, ont été cause

1. Il est vrai que déjà Mersenne avait dit, en 1636 : « Si l'on peut reconnaître ces battements sans l'oreille, elle ne sera pas nécessaire pour accorder l'orgue. »

qu'on en est demeuré là ; mais on sait qu'en fait d'expériences, il ne faut pas se décourager aisément et qu'elles ont pour ainsi dire leurs caprices, qu'on surmonte avec le temps. »

Les commissaires partis, les tuyaux redevinrent sans doute dociles, car Sauveur détermina par ce procédé le son fixe de 100 vibrations. C'est encore ce moyen qui sert aujourd'hui aux facteurs d'orgues à mettre au ton les différents jeux. On observe d'ailleurs les battements aussi bien avec des diapasons ou avec tout autre corps sonore, pourvu que les vibrations durent un temps appréciable.

Quelle est la cause qui produit le phénomène des battements? Sauveur l'a déjà entrevue. D'après lui, « le son des deux tuyaux ensemble doit avoir plus de force quand leurs vibrations, après avoir été quelque temps séparées, viennent à se réunir et s'accordent à frapper l'oreille d'un même coup. »

L'explication des battements repose sur les phénomènes d'*interférence*. On dit que deux vibrations *interfèrent* quand elles se contrarient, quand elles tirent la molécule vibrante en deux sens opposés. C'est ici le cas de dire : l'union fait la force. Quand deux mouvements vibratoires qui tendent à entraîner la même masse concordent, ils s'ajoutent et se renforcent; quand ils sont en opposition, ils s'amoindrissent ou même s'annulent[1]. C'est pour cette raison que la lumière en s'ajoutant à la lumière peut produire de l'ombre; c'est ainsi que deux sons en s'ajoutant peuvent produire du silence.

Nous avons déjà vu comment se composent les mouvements vibratoires et comment cela peut se mettre en

1. Cette concordance des mouvements est également indispensable lorsqu'on veut mettre en branle une cloche, une balançoire, etc. Il ne faut pas que l'effort s'exerce à contre-temps.

évidence au moyen d'une courbe. Imaginons deux vibrations identiques qui commencent ensemble d'agir au même point ; elles ne cesseront de marcher de front, et agissant toujours dans le même sens, elles s'ajouteront à chaque instant : le résultat sera un mouvement de même période, mais beaucoup plus vif, plus énergique (fig. 107). Si ces deux mouvements se rencontrent mal, de sorte que l'un tende, par exemple, à faire monter le même point que l'autre fait descendre, ils se

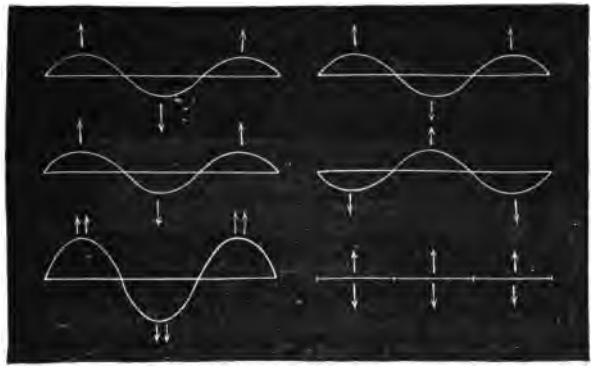


Fig. 107. Concordance. Fig. 108. Opposition.

contrarient sans cesse et, s'ils ont même intensité, se neutralisent complètement (fig. 108). Deux sons de même hauteur et de même force qui se rencontrent ainsi se font taire. On peut constater ce résultat surprenant avec deux tuyaux d'orgue fermés, exactement semblables et montés à côté l'un de l'autre sur la même soufflerie. Tant qu'on ne fait parler qu'un seul des deux, il résonne vigoureusement ; les fait-on parler ensemble, il n'y a presque plus de son, et cependant ils vibrent, on peut s'en assurer en approchant une

barbe de plume de la lèvre de l'embouchure où vient se briser le courant d'air; mais ils vibrent en opposition. Quand le jet d'air se précipite dans l'un pour y produire un compression, il se fait une raréfaction dans le tuyau voisin et réciproquement; l'air ambiant est donc sollicité par deux actions constamment contraires, et comme il n'y a pas de raison pour qu'il obéisse plutôt à l'une qu'à l'autre, il reste en repos : le son ne parvient pas à naître.

Voici comment ce fait peut être mis en évidence : On fait communiquer les deux tuyaux avec deux flammes de Kœnig disposées de telle manière que la pointe de l'une dépasse un petit miroir fixe qui en cache la base,

Fig. 109. Interférences.

mais qui montre par réflexion la base de l'autre flamme. Cela produit l'illusion d'une flamme unique. Si maintenant on regarde cette image hybride dans le miroir tournant pendant qu'on fait parler les deux tuyaux, la pointe se sépare de la base (fig. 109) : ce qui prouve que les deux flammes brillent *alternativement*, et que l'une est aspirée quand l'autre est chassée en avant. Si les deux tuyaux agissent sur *la même* flamme, l'effet est nul, et la flamme reste immobile. Cette expérience a été indiquée par M. Zoch.

Deux vibrations également rapides se renforcent donc ou bien s'affaiblissent, selon la manière dont elles se combinent, mais le même effet persiste ensuite pendant toute la durée du mouvement commun. Il n'en est

plus de même si elles ont des périodes légèrement différentes. Dans ce cas, si l'une est d'abord en retard, elle finira par rattraper l'autre, la dépassera, restera quelque temps en avance, puis retardera de nouveau, et ainsi de suite. Les rencontres se feront de toutes les manières possibles, il y aura tantôt renforcement, tantôt défaillance; les deux notes offriront des alternatives d'éclat et d'extinction plus ou moins complète. Si l'une fait, je suppose, exactement 9 vibrations pendant que l'autre en fait 8, et si les deux mouvements sont à leur origine en opposition, ils commenceront par s'amoindrir

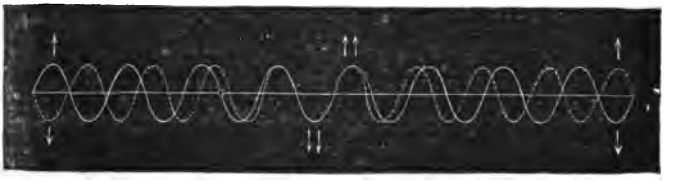


Fig. 110. Battements.

mutuellement ; puis l'un prenant de l'avance, après 8 vibrations simples accomplies d'un côté et 9 de l'autre, les mouvements se trouveront d'accord (fig. 110) et se renforceront; ensuite, après 8 et 9 autres vibrations simples, ils seront encore en opposition et s'affaibliront comme à l'origine. Dans l'intervalle de 8 vibrations doubles d'une part ou de 9 vibrations de l'autre, il y aura toujours un coup de force ou un battement. Il y en aura un chaque fois que la note la plus rapide aura gagné sur l'autre une vibration double (aller et retour).

On peut rendre visible le phénomène de plusieurs manières. Le phonautographe, en écrivant fidèlement les vibrations de l'air, en révèle aussi l'intensité chan-

geante s'il y a eu des battements. Pour obtenir un semblable tracé avec deux diapasons légèrement désaccordés, on n'a qu'à coller sur l'un une plaque de verre noirci et sur l'autre une pointe flexible ; on les fait vibrer parallèlement, et on déplace l'un de manière que la pointe trace un sillon sur l'autre. La courbe tremblée qui se dessine alors offre des renflements autant de fois que l'un des deux diapasons a gagné sur l'autre une vibration complète. La figure 112 montre deux tracés obtenus de cette manière avec deux notes qui étaient d'abord dans le rapport de 24 : 25, ensuite

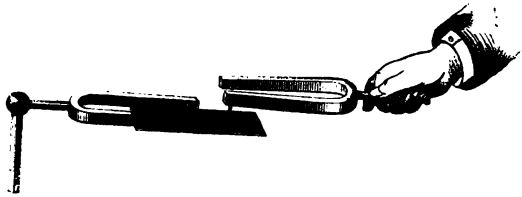
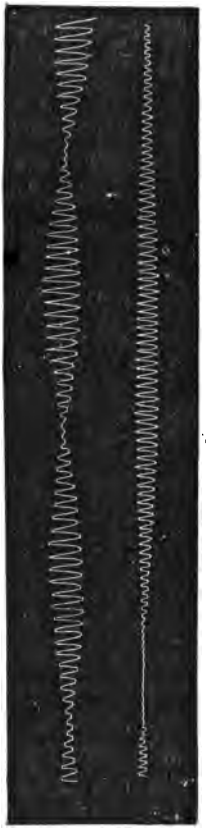


Fig. 111.

dans celui de 80 : 81. Les flammes de Kœnig fournissent un troisième moyen d'observer les battements.

La perception physiologique des battements semble, à première vue, inconciliable avec l'hypothèse d'après laquelle l'oreille sépare toujours les notes de hauteur inégale. Si les deux sons n'agissent pas sur la même fibre, comment peuvent-ils combiner leurs vibrations dans l'appareil auditif? La réponse est très simple. Il ne faut pas oublier que les fibres nerveuses, comme tous les corps élastiques, sont encore influencées, quoique à un moindre degré, par les vibrations *peu éloignées* de leur unisson, de sorte que la sphère d'action de deux sons très voisins s'étend sur tout un large faisceau de

fibres, au lieu de n'embrasser que deux fibres déterminées. On peut admettre qu'une note qui est d'un demi-ton plus élevée ou plus basse que la note d'une fibre donnée, la fait résonner dix fois moins qu'une note qui est à l'unisson ; cette résonance est encore assez sensible. On voit, d'après cela, que l'effet d'ensemble de deux notes voisines qui battent doit se manifester dans toutes les fibres intermédiaires, et que l'oreille doit en être affectée physiquement.



24:25 80:81
Fig. 112.

Quand les coups de force se succèdent avec rapidité, l'effet des battements devient très désagréable ; cela ressemble à une *r* grasseyée, ou au grincement d'une scie sur du bois. Le déplaisir est à son comble, quand il y a de 30 á 40 battements par seconde ; au delà, il devient difficile pour l'oreille de les séparer, et l'impression n'est plus si forte.

L'oreille les perçoit alors comme un son grave, qu'on appelle *son résultant*. Ainsi deux sons simples qui résonnent fortement ensemble, et qui ne diffèrent pas trop l'un de l'autre, engendrent un troisième son dont la hauteur est donnée simplement par la différence des nombres de vibrations des deux sons primaires (ou,

ce qui revient au même, par le nombre des battements que devrait produire le concours de ces deux sons (un battement étant toujours compté pour une vibration double).

Les sons résultants étaient connus avant d'être expliqués. L'organiste Sorge en parle dans un ouvrage publié en 1740. Romieu, de Montpellier, et J. Riccati s'en occupent quelques années plus tard, et le célèbre violoniste Tartini s'efforce d'en faire la base d'un nouveau système musical, dans un livre obscur et difficile à lire (1754). La théorie d'après laquelle les sons résultants ne sont autre chose que des battements très rapides se trouve déjà dans le Mémoire de Lagrange *sur la nature et la propagation du son* (1759) ; on l'attribue d'ordinaire à Thomas Young, qui l'a développée et défendue contre les adversaires qu'elle avait rencontrés. Cette explication des sons résultants soulève en effet une difficulté théorique ; on s'est demandé par quel mécanisme physiologique des variations d'intensité deviennent sensibles comme vibrations sonores. Mais ces difficultés nous paraissent moins sérieuses depuis que M. Kœnig a constaté que des variations d'intensité obtenues par l'interposition d'un disque tournant percé de trous produisaient aussi un son analogue aux sons résultants. Quoi qu'il en soit, l'ancienne théorie de Th. Young nous paraît encore préférable à la théorie subtile de M. Helmholtz, d'après laquelle les sons résultants seraient un phénomène de perturbation du mouvement vibratoire, devenu trop violent pour suivre encore les lois simples des vibrations élastiques. Cette théorie entraînait l'existence de sons résultants d'une nouvelle espèce dont la hauteur devait être égale à la somme des nombres de vibrations des sons primaires ;

mais ces sons nouveaux n'ont jamais été sérieusement observés, et les autres conséquences de cette théorie ne sont pas davantage confirmées par l'expérience.

Il vaut donc mieux s'en tenir à l'ancienne théorie, si simple et si claire. Deux sons de hauteur très peu différente produisent d'abord des battements dont le nombre est égal à la différence de leurs vibrations doubles. C'est ce qu'on observe facilement avec deux diapasons semblables, légèrement désaccordés. A mesure qu'on augmente le désaccord, les battements deviennent plus rapides et se transforment en son résultant, égal à la différence des deux sons primaires.

Qu'arrive-t-il maintenant quand les notes des deux diapasons s'écartent davantage, quand l'intervalle approche de l'octave, ou la dépasse? La réponse nous est fournie par un récent travail de M. Kœnig, qui a complètement élucidé cette question. Deux sons simples a, b, de hauteur sensiblement différente, donnent des battements dont le nombre est égal au reste (positif ou négatif) que fournit la division du plus grand des deux nombres a, b, par le plus petit ; si les battements sont rapides, ils sont perçus comme son résultant. C'est ainsi, par exemple, que les notes 4 et 9 donnent le son résultant 1. Les choses se passent évidemment comme si les battements (ou le son résultant) étaient produits par le plus aigu des deux sons donnés (b) et par l'harmonique du son grave (a) le plus rapproché du son b. Le calcul montre en effet que tel doit être le résultat numérique du phénomène d'interférence pour deux sons simples quelconques a, b, et dans le cas particulier où ces sons diffèrent peu l'un de l'autre, on retombe sur le son résultant $b-a$.

J'ai dit que les choses se passaient comme si le son

grave *a* était remplacé par un harmonique, voisin du son *b*; mais le phénomène s'observe nettement lorsqu'il n'y a aucune trace d'harmoniques, ce qui prouve qu'il est tout à fait indépendant de l'intervention *réelle* des harmoniques qui existent dans les sons musicaux. Si maintenant on emploie des sons musicaux pourvus d'harmoniques, ces derniers peuvent à leur tour battre et même donner naissance à des sons résultants. Il en résulte des effets compliqués dont il est inutile de poursuivre ici l'analyse, d'autant plus que ces phénomènes secondaires ont en général peu d'intensité [1].

Les sons résultants et les battements sont d'un grand secours lorsqu'il s'agit d'accorder des tuyaux d'orgue, des diapasons, etc.; ils indiquent avec une très grande précision la différence de hauteur de deux notes. M. Kœnig a pu ainsi accorder encore un ut_9 de 32 000 vibrations et un $ré_9$ de 36 000 par leur son différentiel, qui est l'ut_6 de 4 000 vibrations. Il espère même qu'il sera possible d'accorder par leurs sons résultants des diapasons dont les notes fondamentales sont trop aiguës pour être encore entendues.

C'est un manufacturier en soieries de Créfeld, Henri Scheibler, qui a surtout contribué à vulgariser l'emploi des battements comme moyen d'accorder les instruments de musique. Cet homme, qui s'était épris d'une belle passion pour l'acoustique, ne consacra pas moins de vingt-cinq ans à perfectionner sa méthode. Il construisit avec

1. Il faut encore mentionner ici les *sons de variation*, qui prennent naissance lorsqu'un son éprouve des changements périodiques d'intensité. C'est le phénomène des battements renversé : le son intermittent produit deux sons fixes, l'un plus aigu, l'autre plus grave que le premier. On les observe, par exemple, avec une plaque vibrante mise en rotation.

une peine inouïe, vu l'état de la science à cette époque, une série de 56 diapasons échelonnés du *la* de 440 au *la* de 880 v., embrassant par conséquent une octave entière par degrés de 8 vibrations simples. Cette série de diapasons formait ce qu'il appelait un *tonomètre*. Pris deux à deux, dans l'ordre où ils se succèdent, ils donnent toujours quatre battements par seconde, qu'il est facile de compter avec le secours d'une montre. On les accorde ainsi par différence, et, quand on arrive au dernier, il faut qu'il soit exactement à l'octave du premier. Si ce résultat a été atteint, on est sûr que le premier fait 440, le dernier 880 vibrations par seconde, car les battements prouvent qu'ils diffèrent de 440, et on sait, d'un autre côté, qu'ils sont entre eux comme 1 : 2. On comprend que ces 56 diapasons, dont les notes sont parfaitement déterminées, permettent d'accorder, avec une précision mathématique, une note quelconque comprise entre les limites de leur octave : on n'a qu'à compter les battements que cette note donne avec le diapason dont elle se rapproche le plus. Si la note est dans une autre octave, on la détermine au moyen d'un diapason supplémentaire qui forme avec elle une octave juste.

Scheibler publia sa méthode en 1834. Il vint aussi à Paris pour y faire la propagande du tonomètre, mais la difficulté de le construire effraya les facteurs. M. Wolfel seul eut la patience de s'en construire un pour mieux accorder ses pianos. Aujourd'hui cette précieuse méthode est à la portée de tout le monde. M. Kœnig construit couramment des tonomètres de 65 diapasons qui embrassent l'octave moyenne du piano (de 512 à 1024 vibrations simples). Il est même allé plus loin : il a rempli de la même manière toute l'échelle des sons perceptibles. Dans les octaves basses, on abrège en se

servant de grands diapasons, munis de poids mobiles que l'on fait glisser sur les branches; suivant la position des poids, le diapason donne des notes différentes. Dans les octaves très élevées, M. Kœnig remplace les diapasons par des tiges droites. Le tonomètre qu'il a exposé en 1867 se compose : 1° de huit grands diapasons pour les quatre octaves comprises entre l'*ut* de 32 et celui de 512 vibrations simples ; chacun de ces diapasons peut donner 32 notes, de sorte qu'ils représentent ensemble une échelle de 256 notes ; 2° l'octave moyenne (512-1024) est représentée par 64, l'octave suivante (1024-2048) par 86, celle qui suit (2048-4096) par 172 diapasons, ce qui fait un total de 330 fourchettes d'acier ; 3° à partir de l'ut_6 de 4096 vibrations, M. Kœnig emploie des tiges d'acier, dont la longueur est inversement proportionnelle à la hauteur de leur son longitudinal; 96 tiges représentent ainsi les quatre octaves depuis ut_8 jusqu'à ut_{10} (64 000). La dernière octave est déjà en dehors des limites des sons perceptibles, peu de personnes entendent encore le *sol* d'environ 48 000 vibrations. M. Kœnig obtient cette note aussi par les vibrations transversales d'une tige d'environ $0^m,08$.

Deux diapasons accordés de manière qu'ils diffèrent exactement de deux vibrations simples, *battent* la seconde absolument comme un pendule; s'ils diffèrent davantage, ils peuvent battre une fraction de seconde aussi petite qu'on le voudra.

En comptant les battements, on peut aussi vérifier un phénomène très curieux : l'influence d'un mouvement de translation de la source sonore sur la hauteur du son qui arrive à l'oreille. M. Kœnig prend deux diapasons ut_4 donnant 4 battements par seconde lors-

qu'on les laisse en place ; il s'éloigne d'environ 0,^{m}65 du plus aigu, et promène l'autre entre celui-ci et l'oreille, les yeux toujours fixés sur un pendule ; quand le mouvement de va-et-vient est rythmé sur le balancier, l'observateur n'entend plus que 3 battements dans la seconde où le diapason grave s'approche de l'oreille, mais en revanche 5 pendant qu'il s'éloigne. Il s'ensuit que le ton de ce diapason s'élève d'une vibration double pen-

Fig. 113. Influence du mouvement sur la hauteur des sons.

dant la première seconde et s'abaisse d'autant pendant la seconde suivante. C'est qu'en effet, en le rapprochant de 0,^{m}65, qui représentent sa longueur d'onde, on doit gagner une vibration complète, et en perdre une en l'éloignant d'autant, absolument comme les navigateurs qui font le tour du monde perdent ou gagnent un jour, suivant qu'ils vont avec ou contre le soleil (d'orient en occident ou d'occident en orient).

Les chemins de fer offrent souvent l'occasion d'observer des phénomènes de ce genre. Ainsi, le sifflet du mécanicien paraît plus aigu quand le train arrive que lorsqu'il s'éloigne. En prenant 50 kilomètres à l'heure

pour la vitesse moyenne des convois, on trouve qu'ils font 14 mètres par seconde, ce qui est $\frac{1}{24}$ de la vitesse du son ; dès lors, le calcul montre que, pour un observateur placé sur la voie, la note du sifflet sera altérée dans le rapport de 24 à 25 ; il l'estimera trop haute ou trop basse d'un demi ton, selon la direction du mouvement. Si c'est un *la* pour le mécanicien, ce sera pour les cantonniers un *la* ♯ à l'approche du train, et un *la* ♭ après son passage. Un sifflet immobile produira le même effet pour les voyageurs ; ils n'entendront la note juste qu'au moment où ils passent. Si l'observateur et le sifflet sont emportés dans deux directions opposées, l'effet sera encore plus sensible ; la note semblera tour à tour trop haute ou trop basse d'un tou entier ; au moment où les trains se rencontrent, elle sautera d'une tierce majeure.

M. Buys-Ballot a fait, en 1845, quelques expériences de ce genre sur le chemin de fer d'Utrecht à Maarsen. On avait placé, à des distances d'un kilomètre, trois groupes de musiciens le plus près possible de la voie. Un musicien, juché sur la locomotive, sonnait de la trompette, d'abord en partant d'Utrecht, puis entre les trois groupes, et enfin après les avoir dépassés ; les autres estimaient la hauteur variable de la note ; elle était toujours conforme à la théorie[1]. M. Scott Russel a fait remarquer que la réflexion des bruits d'un convoi sur les piles d'un pont doit produire le même effet que le mouvement opposé de deux trains, et que les notes qui reviennent altérées d'un ton entier se mêlent alors désagréablement à celles qui sont entendues directement. Pour obtenir par la réflexion

1. Parmi les expériences plus récentes, on peut citer celles de M. Vogel et de M. G. Quesneville.

des tierces mineures, il faudrait faire marcher les convois avec une vitesse de 122 kilomètres à l'heure.

M. Kœnig a observé des battements avec un seul diapason qu'il approchait et qu'il éloignait tour à tour d'un mur.

Doppler, qui a le premier signalé ces phénomènes en 1842, pensait qu'ils pouvaient aussi avoir lieu pour la lumière, et il y cherchait l'explication des couleurs des étoiles. Mais il faudrait pour cela admettre des vitesses de translation prodigieuses. Ce qui paraît prouvé aujourd'hui, c'est que les mouvements des astres produisent un léger déplacement des raies de leurs spectres.

XIII

LA VOIX

Organe de la voix. — Basse, ténor, alto, soprano. — Les voix célèbres. — Chant et voix parlée. — Voyelles et consonnes. — Ventriloques.

Les sublimes effets de la voix humaine sont produits par un bien chétif organe. Quelques cartilages, une paire de ligaments, un faisceau de muscles, voilà ce qui a suffi à la nature pour créer un instrument musical dont aucune invention humaine n'a pu atteindre la suavité ni le pouvoir émouvant.

L'appareil vocal de l'homme est une anche à deux lèvres : il se compose du *larynx*, tube cartilagineux qui forme en avant du cou la *pomme d'Adam ;* des *cordes vocales*, ligaments flexibles qui ne laissent entre eux qu'une fente étroite, l'*ouverture de la glotte ;* des poumons, qui fournissent le vent, et des cavités de la bouche, où la voix brute est façonnée en voyelles et consonnes.

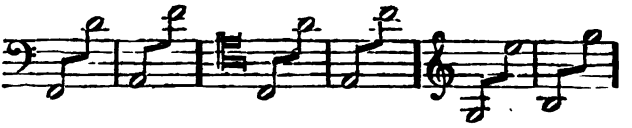
Les cordes vocales peuvent s'écarter ou se rapprocher, se relâcher ou se tendre, par l'action de muscles spéciaux ; le courant d'air qui vient des poumons les

fait vibrer, et c'est leur frémissement qui produit le son. Grâce au laryngoscope, appareil ingénieux qui permet d'éclairer l'intérieur de la bouche et d'y observer la formation de la voix, on connaît aujourd'hui d'une manière très précise les différentes conditions qui la modifient. La voix de poitrine exige, pour se produire, un affrontement très complet, un contact très intime des lèvres de la glotte. Les rubans vocaux vibrent alors dans toute leur étendue. Dans le registre de fausset, ils ne vibrent que par leur bord libre, et la glotte s'ouvre de manière à former une fente elliptique. Des chanteurs exercés peuvent faire entendre alternativement la même note en voix de poitrine et en voix de fausset sans respirer. Mais l'on doit classer parmi les miracles ce que Garcia raconte de paysans russes qu'il aurait entendus chanter simultanément un air en voix de poitrine et un air en voix de tête.

Si les voix de femmes sont plus aiguës que les voix d'hommes, c'est à cause des dimensions plus petites du larynx. Chez l'homme, l'ouverture de la glotte est à peu près deux fois plus grande que chez la femme ou chez les enfants. A l'âge de la puberté, la glotte de l'homme se développe brusquement et sa voix descend généralement d'une octave : on dit alors qu'elle *mue*. Chez les castrats ce changement n'a point lieu, leur voix reste enfantine; c'est une voix abstraite, sans sexe. Dans quelques cas très rares, le même arrêt de développement se rencontre chez l'homme à l'état normal. Ainsi, M. Dupart, âgé de vingt-neuf ans et père de deux enfants, avait une voix de soprano très remarquable; elle était souvent utilisée dans les messes solennelles qui se chantent à Paris.

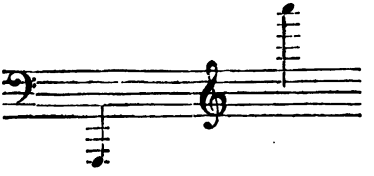
On divise les voix d'hommes en *basse* ou basse-taille,

baryton ténor, et *premier ténor* ou *haute-contre*, voix devenue aujourd'hui fort rare. Les voix de femmes sont : le *contralto*, le *mezzo-soprano* et le *soprano*. Voici la portée qu'on assigne ordinairement à ces différentes voix.



$fa-ré_3$	$la-fa_3$	ut_2-la_3	mi_2-ut_4	sol_2-mi_4	si_2-sol_4
Basse.	Baryton.	Ténor.	Contralto. (1er ténor.)	Mezzo-soprano.	Soprano.

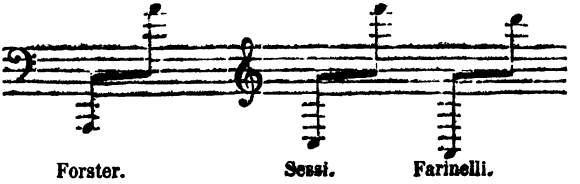
Ce tableau montre que les voix ordinaires n'embrassent pas deux octaves pleines. La différence entre le *fa* inférieur de la basse (174 vibrations simples) et le *sol* supérieur du soprano (1 566 vibrations) est d'un peu plus de trois octaves. Mais ces limites se reculent pour quelques voix exceptionnelles. D'une part, on cite des basses qui atteignaient le fa_{-1} de 87 vibrations, qui appartient à la première octave du piano, et de l'autre des voix de castrats, d'enfants et de femmes,



qui sont allées jusqu'au fa_8 ou *fa* suraigu, de 2 784 vibrations (de l'avant-dernière octave du piano), et même encore au delà.

La voix du maître de chapelle danois Gaspard Forster s'étendait sur trois octaves (de la_{-1} à la_3), celle de la

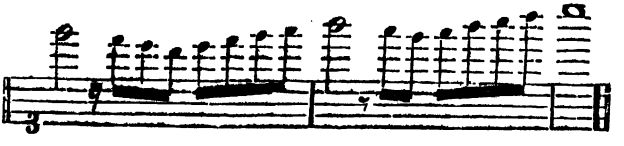
plus jeune des sœurs Sessi embrassait trois octaves et demie (de ut_2 à fa_5).



La Catalani commandait également trois octaves et demie, comme aussi le célèbre castrat Farinelli, qui allait du *la* au re_5.

A la cour de Bavière, il y avait, au seizième siècle, du temps d'Orlando di Lasso, trois basses, les frères Fischer et un nommé Grasser, qui atteignait le fa_{-1} de treize pieds, d'après ce qne dit Prætorius dans son *Syntagma musicum*.

Mlle Nilsson et Carlotta Patti atteignent des hauteurs inouïes. Lorsqu'elle joue la reine de la nuit, dans *la Flûte enchantée*, Mlle Nilsson monte au *fa* suraigu (fa_5). Mais la voix la plus élevée qui peut-être ait jamais existé paraît avoir été celle de Lucrezia Ajugari, dite la *Bastardella*, que Mozart a entendue à Parme en 1770. Dans une lettre adressée à sa sœur Marianne, il transcrit plusieurs passages que cette cantatrice a chantés devant lui; nous n'en citerons que le dernier, qui se termine par un ut_6:



On trouve là des trilles sur le $ré_5$ et autres ornements

aussi vraisemblables. Le père de Mozart ajoute, à ce propos, que la Bastardella chantait ces passages avec un peu moins de force que les notes plus basses, mais que sa voix restait pure comme une flûte. Elle descendait facilement jusqu'au sol_2. Elle n'était ni belle, ni laide, avait quelquefois les yeux hagards comme les personnes sujettes aux attaques de nerfs, et boitait. Sa réputation était d'ailleurs excellente.

Oulibicheff cite, comme pendant, une madame Becker qui, en 1823, étonna Saint-Pétersbourg par ses roulades. Kuhlau a écrit pour cette cantatrice la partie d'Adélaïde dans son opéra *le Château des brigands*, le grand air du troisième acte va jusqu'au la_5. A une représentation, au moment de donner cette note dangereuse, le chef d'orchestre la regarda fixement, ce qui la troubla tellement qu'elle donna un ut_6.

Le timbre de la voix dépend, comme nous l'avons déjà expliqué, du nombre et de la force de ses harmoniques.

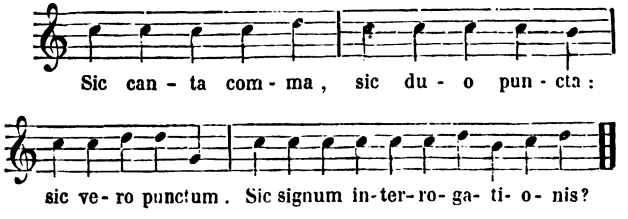
On appelle une voix *juste* celle qui passe sans hésitation d'une note à l'autre ; l'exercice y est pour beaucoup, mais il faut aussi de la mémoire musicale. La hauteur absolue des notes se grave difficilement dans la mémoire. Toutefois les musiciens de profession finissent par savoir leur *la;* on en rencontre qui donnent de la voix, sans se tromper, une note quelconque qui leur est désignée par son nom.

La différence entre la voix de chant et la voix parlée consiste en ce que la première saute d'intervalle en intervalle, tandis que la voix du discours s'élève et s'abaisse par un mouvement continu. La voix chantante se soutient sur le même ton, comme sur un point indivisible, ce qui n'arrive pas dans la simple prononcia-

tion, où les sons ne sont pas assez *uns* pour être appréciés au point de vue musical.

La déclamation tragique des anciens se rapprochait du chant et s'accompagnait par la lyre. On en retrouve comme un souvenir dans le débit traînant des déclamateurs italiens et dans la récitation monotone de la liturgie romaine. Au reste, le récitatif forme encore dans la musique moderne comme un trait d'union entre le chant et la parole. On peut même dire que jusqu'à un certain point le chant mélodieux n'est qu'une imitation artificielle, idéalisée, des accents de la voix parlante ou passionnée. On crie et l'on se plaint sans chanter, mais on imite en chantant les cris et les plaintes.

Avec un peu d'attention, on remarque aussi dans le discours ordinaire des vestiges d'une intonation musicale. Les syllabes accentuées, les chutes de phrases, sont marquées par un changement de ton. D'après M. Helmholtz, dans une phrase affirmative allemande, le point absolu est indiqué par une chute qui est d'une quarte, et le point d'interrogation monte d'une quinte. On trouve des indications de ce genre dans les formules du chant grégorien.



Dans la langue chinoise, l'intonation est même un élément grammatical.

Grétry s'amusait à noter aussi exactement que pos-

sible le *bonjour*, *monsieur*, de tous ses visiteurs. « Si l'on pouvait traduire ainsi en sons musicaux les phrases les plus chantantes, les interrogations, les menaces, les sens ironiques, etc., dit M. Ch. Beauquier, on trouverait chez les individus d'une même nation une façon à peu près semblable d'accentuer les phrases. Pour une autre nation, ce chant différerait. L'Italien module beaucoup, l'Allemand un peu moins, l'Anglais pas du tout... »

Les sons de la voix articulée se divisent en *voyelles* et *consonnes*. Les voyelles sont des timbres différents, dus à la résonnance de la bouche, les consonnes ne sont guère autre chose que des bruits, ainsi que nous l'avons déjà expliqué. Les lèvres, la langue, le palais, les dents prennent part à la production de ces bruissements caractéristiques qui constituent pour ainsi dire la charpente de la parole, et que les Orientaux écrivent seuls, en négligeant les voyelles. L'enfant s'en tient aux voyelles, il n'apprend que peu à peu à prononcer les consonnes, et en même temps son langage devient plus humain.

On a cru remarquer que les lettres de l'alphabet avaient certains caractères psychologiques. Écoutons par exemple le P. Mersenne.

« Les voyelles *a* et *o*, dit-il, sont propres pour signifier ce qui est grand et plein, et parce que *a* se prononce avec une grande ouverture de la bouche, elle signifie les choses ouvertes et les actions dont on use pour ouvrir et pour commencer quelque ouvrage. De là vient que Virgile a commencé son *Énéide* par cette diction : *Arma*.

« La voyelle *e* signifie les choses déliées et subtiles, et est propre pour exprimer le deuil et la douleur.

Heu quæ me miserum tellus, quæ me æquora possunt!

« La voyelle *i* signifie les choses très minces et très petites. De là vient la diction *minime*. Elle exprime aussi ce qui est pénétrant.

« *O* sert pour exprimer les grandes passions: *O patria! o tempora! o mores!* et pour représenter les choses qui sont rondes, parce que la bouche se forme en rond lorsqu'elle la prononce.

« *U* est affectée aux choses obscures et cachées. »

Il classe ensuite les consonnes. Il veut qu'une *f* indique un souffle, un vent (*flatus*) ; *s* et *x* les choses âpres (*stridor*) ; *r* les choses rudes, dures, raboteuses, les actions véhémentes et impétueuses, ce qui lui a valu le nom de lettre canine ; *m* tout ce qui est grand (*magnus, monstre*) ; *n* des choses noires, cachées, obscures; et ainsi de suite.

Boiste, dans ses *Observations sur la prononciation*, dit que l'*e* est comme l'âme de la langue française ; c'est la lettre la plus mobile, la plus changeante, celle dont le son a le plus de nuances. D'après le même auteur « le doublement de l'*f* annonce tour à tour l'aigreur ou la prétention, le pédantisme ou la satire: il pique, il régente, il domine, il mord avec elle dans *en effet, qu'ai-je affaire, cela suffit, c'est affreux*. Il faut être né Français, et instruit, pour jouer avec art et justesse de cet instrument non moins délicat que l'*e*, le *c*, etc.: il fait le désespoir de ceux qui soutiennent, contre le bon sens et le tact, que la Prononciation est figurable. »

Les mots formés par *onomatopée* imitent plus ou moins bien des bruits naturels: *glouglou, cliquetis, froufrou, bourdonnement*, etc. Les grands poètes ne négligent par les caractères des voyelles et consonnes, et en tirent des effets souvent très heureux. On connaît le vers de Virgile, dans lequel le bruit des sabots

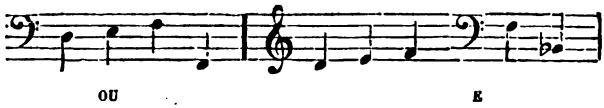
d'un cheval est rendu par une suite de vigoureux dactyles :

Quadrupedante putrem sonitu quatit ungula campum,

et ce vers d'Homère :

Τριχθάτε καὶ τετραχθὰ διατρυφὲν ἔκπεσε χειρός.

Une remarque assez curieuse à faire à l'égard des voyelles, c'est que chacune a ses places favorites dans l'échelle musicale. D'après M. Helmholz, les voyelles qui conviennent à une note donnée sont d'abord celle dont la caractéristique est un peu plus élevée que la note en question, ensuite celles dont la caractéristique est l'octave ou la douzième de la même note. L'OU, dont la caractéristique est fa_2, se produit surtout avec facilité sur les notes $ré_2$, mi_2, fa_2 et fa. L'E aime surtout $ré_3$ mi_3, fa_3, puis encore fa_2 et $si\ \flat$, à cause de sa caractéristique fa_3.



Cette affinité des voyelles pour de certaines notes fixes se constate principalement aux limites des registres de fausset ou de poitrine. Une voix de femme qui veut donner une note plus grave que l'ut_5 tourne toujours involontairement à l'O ou à l'OU. Au delà du mi_4, c'est d'abord l'A qui sort avec le plus de facilité ; en dépassant le si_4, on tombe dans le domaine de l'I. Ce sont là des faits qui intéressent à un haut degré les compositeurs et les librettistes.

Jean Müller et d'autres physiologistes ont étudié le mécanisme de la voix humaine au moyen de larynx artificiels, fabriqués avec des bandes de caoutchouc que

l'on fixe à l'extrémité d'un tube et auxquelles des pinces permettent de donner une tension variable. En soufflant dans ces appareils, on produit des sons très semblables à ceux de la voix.

Pour imiter les voyelles, la théorie du timbre montre qu'il faut renfoncer dans ces sons certaines notes fixes. C'est ainsi que Willis produit artificiellement les voyelles à l'aide d'un sifflet à anche, monté sur un tuyau dont on peut à volonté varier la longueur. A la place de ce tuyau on pourrait se servir de résonateurs accordés pour les notes caractéristiques des voyelles.

En ajoutant à ces appareils des membranes susceptibles de produire les bruits qui caractérisent les consonnes, il est possible d'imiter la parole. On connaît ces poupées mécaniques qui disent très bien *papa*, *maman*. A Londres, j'ai vu chez M. Wheatstone une espèce de cornemuse qui prononce de courtes phrases. Mersenne parle d'un orgue qui prononçait les voyelles et les consonnes. En 1791, van Kempelen montrait un automate qui parlait, mais des témoignages contemporains ne donnent pas une grande idée de la ressemblance de ces sons artificiels avec ceux de la voix. La *machine parlante* qui fut construite plus tard (1842) par un mécanicien de Vienne, nommé Faber, était plus parfaite. Elle a encore fait le tour de l'Europe ces années dernières, et on a pu la voir à Paris en 1879. On peut enfin citer la machine parlante de Mical (1780) et celle de Kratzenstein (1782).

Le jeu d'orgue qu'on appelle la *voix humaine* n'est qu'un registre de tuyaux d'étain très courts qui fournissent un son le plus souvent aigre et criard.

Chez les oiseaux, l'appareil vocal se trouve placé très bas dans le gosier; c'est ce qui fait que Cuvier a

pu couper le cou à un oiseau criard sans l'empêcher de crier. Chez l'homme, une ouverture accidentelle du larynx rend la formation de la voix impossible : Magendie connaissait un homme qui était obligé de porter toujours une cravate avec un clapet pour boucher une fuite qu'il avait dans le gosier.

Les *ventriloques* ne parlent pas autrement que le commun des mortels, seulement ils évitent d'ouvrir la bouche assez grande pour qu'on puisse les voir parler, expirent le moins possible et remuent à peine les lèvres. Leur voix paraît alors changée, plus sourde, et comme venant de très loin. Cela ne s'obtient pas sans un grand effort de poumons, qui fatigue la poitrine et qui oblige les ventriloques à reprendre de temps à autre leur voix naturelle; le dialogue les repose en même temps qu'il les aide à tromper les assistants. Ils parlent aussi en aspirant, et le son étouffé qu'ils produisent ainsi semble avoir traversé des masses sourdes, comme les murs et le plancher. Ils complètent l'illusion en imitant les inflexions qu'on emploie quand on crie de très loin, et en désignant d'une manière plus ou moins ingénieuse le côté où ils veulent que l'on cherche l'origine du son. Mais une fois qu'on est familiarisé avec la voix d'un ventriloque, on n'est plus trompé par lui; Robertson fit cette expérience avec son domestique, qui était un fameux ventriloque.

Ce que les ventriloques trouvent en général très facile c'est d'imiter une voix d'enfant. Ce qu'il y a de plus difficile pour eux, c'est de chanter avec une voix d'emprunt; ils y réussissent rarement.

Cet art libéral était connu de toute antiquité; les sorciers et sorcières le pratiquaient. Parmi les ventriloques célèbres, nous citerons Louis Brabant, valet de

chambre de François Ier; Saint-Gille, le baron van Mengen, Charles, Comte, etc. On raconte sur ce dernier une foule d'anecdotes plus ou moins extravagantes. A Tours, il fit un jour enfoncer une boutique fermée dans laquelle on entendait gémir une personne qui mourait de faim. A Reims, il sema la terreur parmi les habitants en faisant parler les morts. A Nevers, un âne déclara subitement, avec force invectives, qu'il refusait de porter plus loin son cavalier. Ailleurs, Comte guérit des possédés en exorcisant leurs démons, que l'on entend s'envoler en hurlant. Dans une église envahie par des révolutionnaires qui s'apprêtent à y tout démolir, Comte fait parler les statues : elles reprochent aux iconoclastes leur vandalisme, et ceux-ci prennent la fuite, affolés de terreur. Un jour, il se sauva ainsi des griffes des paysans de Fribourg, qui voulaient le brûler comme sorcier ; il les mit en déroute par une voix de tonnerre qu'il fit sortir du four vers lequel on le traînait.

XIV

L'OREILLE

Oreille externe et interne. — Osselets. — Mécanisme de l'audition. — Inégalité des deux oreilles. — Jugement de la direction des sons.

Des deux côtés de la tête, la nature a placé les oreilles, chargées de recevoir et d'introduire en présence de l'esprit les sons qui arrivent comme d'invisibles messagers de la nature. Ce n'est pas qu'ils ne puissent parvenir au nerf auditif par une autre porte. Nous avons vu qu'on peut entendre par l'intermédiaire des dents; il existe même des exemples de sourds qui entendaient par l'épigastre; ainsi, une dame comprenait tout ce que disait sa servante quand celle-ci lui appliquait la main sur le creux de l'estomac. Mais la route normale par laquelle nous arrivent les impressions sonores, c'est le conduit auditif.

Chez l'homme et chez les mammifères, l'organe de l'ouïe comprend trois compartiments successifs : l'oreille *externe*, l'oreille *moyenne*, l'oreille *interne* (fig. 114).

L'oreille externe se compose d'un entonnoir C, qui

s'ouvre au dehors à la base de l'os temporal, et d'un pavillon charnu, soutenu par des cartilages. C'est une espèce de cornet acoustique, destiné à recueillir et à concentrer les ondes sonores; lorsqu'il manque ou qu'il est seulement aplati contre la tête, l'ouïe perd beaucoup de sa finesse. Chez beaucoup d'animaux, cette

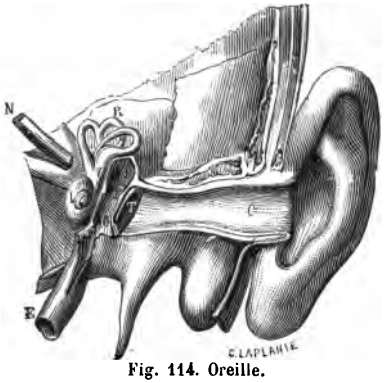


Fig. 114. Oreille.

conque est mobile : les chevaux, les chiens *dressent* les oreilles pour mieux entendre. Ce mouvement est produit par le muscle peaucier de la tête. Chez l'homme, c'est une faculté très rare. J'ai connu un jeune médecin qui pouvait faire aller ses oreilles comme il voulait.

L'oreille moyenne est séparée de l'oreille externe par une membrane T, appelée *tympan*, qui forme une sorte de caisse creusée dans la partie la plus dure de l'os temporal. C'est cette membrane qui reçoit les vibrations sonores et les transmet à l'intérieur. Chez les oiseaux et les reptiles, elle est presque à fleur de tête.

La caisse du tympan communique librement avec l'arrière-bouche par la *trompe d'Eustache* E, et c'est grâce à cette circonstance que l'air qu'elle renferme

s'équilibre sans cesse avec l'atmosphère. On s'assure facilement que cette communication existe. Quand on souffle en fermant le nez et la bouche, on sent que le tympan se gonfle sous la pression de l'air intérieur, et si on aspire dans ces conditions, il est tiré en dedans. Ceci explique pourquoi il est bon d'ouvrir la bouche lorsqu'on est à côté d'une pièce d'artillerie qui tire : on diminue ainsi la pression que la détonation exercerait sur le tympan, si elle n'arrivait que par le conduit auditif.

La paroi osseuse opposée au tympan est percée de deux petits trous *o*, *o'*, qu'on nomme la *fenêtre ronde* et la *fenêtre ovale*, et qui sont fermés tous les deux par des membranes très minces. La fenêtre ovale, qui est au-dessus de l'autre, communique avec la membrane du tympan par la chaîne des osselets ; ce sont : le marteau *m* (fig. 115) dont la queue s'attache au milieu du tympan *t ;* l'enclume *n* qui ressemble à une molaire et sur laquelle s'appuie la tête du marteau ; le petit *os lenticulaire l* et l'*étrier e*, qui adhère par sa base à la membrane de la fenêtre ovale. De petits muscles attachés aux parois de la caisse peuvent agir sur le marteau et sur l'enclume et les faire tourner ensemble autour d'un axe horizontal ; la queue du marteau tire ou pousse alors la membrane du tympan, et la queue de l'enclume agit sur l'étrier.

Fig. 115. Osselets.

L'oreille interne ou *labyrinthe* se compose du *vestibule* V (fig. 114), surmonté des trois *canaux semi-circulaires* R et du *limaçon* L, qui a exactement la forme extérieure et intérieure d'une coquille turbinée. Le vestibule s'abouche à la fenêtre ovale, le limaçon à la fenêtre ronde, mais ils communiquent entre eux par une

ouverture assez large. Le labyrinthe osseux renferme le labyrinthe membraneux, espèce de sac qui a la même forme générale et qui représente la doublure intérieure de ces diverses cavités; il nage dans un liquide appelé la *vitrée auditive* et reçoit les terminaisons du nerf acoustique N.

Voici maintenant le mécanisme de l'audition. Les vibrations du tympan se communiquent par l'air de la caisse à la fenêtre ronde et par les osselets à la fenêtre ovale. Les membranes qui ferment ces orifices font vibrer le liquide du labyrinthe et, par suite, les filets flottants du nerf acoustique; c'est ainsi que naît la sensation du son.

Le marteau sert probablement aussi à donner au tympan une tension variable lorsqu'on *écoute* avec attention. Les mouvements du muscle qui le commande peuvent être volontaires; Fabrice d'Aquapendente produisait un petit bruit dans son oreille en agissant sur le marteau, et Müller, qui possédait la même faculté, faisait craquer ses osselets de manière qu'une autre personne pouvait l'entendre. M. Daguin a observé que, lorsqu'il maniait dans le silence des objets très petits et qu'il en laissait tomber un par mégarde, il entendait un tintement bref et aigu, dû probablement à la même cause. Ces faits peuvent prouver que le marteau tend le tympan lorsqu'on *prête l'oreille*, comme la pupille s'accommode lorsqu'on veut fixer l'œil sur un objet.

Le tympan n'est pas absolument indispensable à l'ouïe; quand il est déchiré, on entend encore, quoique moins bien, par les membranes des deux fenêtres, que l'air ambiant ébranle alors directement.

La membrane intérieure du limaçon est tapissée de fibrilles élastiques, qui ont été découvertes par le mar-

quis de Corti et qui portent son nom. Les *fibres de Corti* forment, en quelque sorte, les terminaisons des filets du nerf auditif. M. Helmholtz avait d'abord pensé qu'elles étaient accordées chacune pour une note spéciale, et, comme elles sont au nombre de plus de 3000, il y en aurait eu environ 400 pour chaque octave ; elles auraient donc formé un clavier bien suffisant pour répondre à toutes les notes que l'oreille peut distinguer. Nous avons déjà vu comment cette disposition naturelle pouvait expliquer la perception du timbre musical.

Mais les recherches récentes de M. Victor Hensen et de M. Hasse ont prouvé que les arcs de Corti (qui d'ailleurs manquent chez les oiseaux et les amphibies) ne sont guère aptes à remplir le rôle qu'on leur avait d'abord assigné : ce sont des organes accessoires qui ne servent probablement qu'à transmettre aux nerfs auditifs les vibrations de la *membrane basilaire*, qui leur sert de support. Ce serait donc, en définitive, dans les fibres radiales de la membrane basilaire qu'on trouverait ce système de cordes destiné à opérer l'analyse du timbre musical. Cette membrane, dont la largeur va en croissant, de la fenêtre ronde à la coupole du limaçon, n'est fortement tendue que dans le sens transversal, c'est-à-dire dans le sens de sa largeur ; elle représente un système d'environ 6000 fibres parallèles qui vibrent par influence à l'unisson de toutes les notes perceptibles à l'oreille, et recomposent ainsi le timbre d'un son musical par la fusion de ses éléments [1].

M. Helmholtz invoque encore à l'appui de sa théorie les recherches de M. Hensen sur l'ouïe des crustacés

1. On trouvera une description détaillée de ces divers organes dans le livre de M. Gavarret : *les Phénomènes de la Phonation et de l'audition*. Paris, 1879. Masson.

décapodes. Ayant placé des palémons ou des mysis dans de l'eau de mer chargée de strychnine, afin d'augmenter le pouvoir réflexe des centres nerveux, M. Hensen a vu ces animaux tomber en convulsions au moindre bruit. Il a constaté ensuite que l'audition a lieu chez eux par l'intermédiaire de poils auditifs, et que chaque brin vibre à l'unisson d'une note déterminée. Lorsqu'il regardait sous le microscope le point d'attache d'une corde nerveuse à la languette d'un poil pendant qu'un musicien jouait du cor, ce point devenait indistinct par suite du mouvement très rapide du poil chaque fois qu'on donnait certaines notes, tandis que les poils voisins restaient immobiles. L'un de ces brins répondait à *ré*$_2$# et à *ré*$_3$#, un peu moins à *sol*$_2$ et encore moins à *sol;* il avait probablement pour ton fondamental un harmonique commun à ces quatre notes et situé entre *ré*$_4$ et *ré*$_4$#. Un autre brin vibrait sous l'influence des notes *la*$_2$#, *ré*$_2$# et *la*#, ce qui indiquait le ton *la*$_3$#.

Dans le vestibule et les canaux semi-circulaires, les terminaisons des nerfs se trouvent dans d'autres conditions. On y remarque de petits cristaux appelés *otolithes* et des poils élastiques qui paraissent destinés à soutenir mécaniquement les vibrations des filets nerveux. Scarpa et Tréviranus croyaient que cette constitution différente des diverses ramifications du nerf acoustique devait avoir pour but de nous faire distinguer la hauteur et le timbre des sons; mais l'état actuel de nos connaissancss ne permet pas encore de tout définir dans cette mystérieuse organisation de l'appareil auditif.

La paralysie du nerf acoustique entraîne une surdité incurable. L'atrophie de certaines parties du réseau de Corti expliquerait la surdité partielle qui est cause

qu'on n'entend plus des sons d'une certaine hauteur. Les notes très élevées cessent d'être perceptibles pour beaucoup d'oreilles. Wollaston a trouvé plusieurs personnes incapables de distinguer la stridulation aiguë des grillons, et d'autres qui n'entendaient même pas le pépiement des moineaux. Pourquoi n'y aurait-il pas des animaux pour lesquels les sons trop aigus pour les oreilles humaines seraient encore perceptibles? Certaines espèces de criquets se trémoussent comme leurs congénères, mais sans qu'on entende la moindre stridulation : peut-être qu'en réalité ils font une musique qui n'est perceptible que pour ses auditeurs naturels.

On rencontre des musiciens qui jouent dans un orchestre et remarquent la moindre fausse note, mais qui ne peuvent faire une conversation sans se servir d'un cornet acoustique. Un phénomène très bizarre est celui que M. Willis a désigné sous le nom de *paracousis*. Voici en quoi il consiste. Certaines personnes qui ont l'oreille dure et qui ordinairement n'entendent pas les sons faibles, les entendent tout à coup lorsqu'ils sont accompagnés d'un grand bruit. M. Willis a connu une dame qui se faisait toujours suivre par une servante chargée de battre le tambour pendant qu'on lui parlait; elle entendait alors très bien. Une autre personne n'entendait que lorsqu'on sonnait les cloches. Holder cite deux autres exemples analogues : celui d'un homme qui était sourd lorsqu'on ne battait pas la grosse caisse à côté de lui, et celui d'un autre qui n'entendait jamais si bien que lorsqu'il était dans une voiture qui cahotait sur le pavé. Un apprenti cordonnier ne comprenait que pendant que le maître battait le cuir sur la pierre. Ces faits s'expliquent probablement par le relâchement habituel des muscles du marteau, qui ne tendent plus

le tympan que lorsqu'ils sont excités par des vibrations très fortes.

Chez beaucoup de personnes, les deux oreilles sont inégalement sensibles. D'après les expériences de M. Fechner, on entend généralement mieux du côté gauche que du côté droit. M. Fechner croit que l'habitude de dormir sur l'oreille droite est la cause probable de cette différence. Itard cite un autre fait plus curieux : il dit avoir connu un individu dont les deux oreilles entendaient toujours deux notes différentes. M. Fessel, de Cologne, a fait récemment la même observation sur lui-même. Pour son oreille droite, le même son est plus aigu que pour l'autre oreille. Frappé de ce fait, M. Fessel a examiné l'ouïe d'un grand nombre de personnes, et il a constaté que la même infirmité était beaucoup plus répandue qu'on ne l'aurait cru. De sorte qu'on peut demander à un musicien s'il entend parler de son *la* droit ou de son l*a* gauche. M. Fessel prétend même que le phénomène est objectif, et que le même diapason donne réellement une note de résonance plus élevée lorsqu'il vibre devant l'oreille à laquelle il paraît plus aigu que lorsqu'il vibre devant l'oreille opposée ; cette note de résonance est entendue de la même manière par une autre personne que celle qui fait l'expérience.

Comme les deux yeux nous procurent l'impression du relief géométrique des corps, les deux oreilles nous servent à juger de la direction des sons. Lorsqu'on a les yeux bandés et une oreille bouchée, on croit que tous les sons viennent dans la direction de l'oreille libre ; ou du moins le jugement devient très incertain. C'est la conque de l'oreille qui nous aide surtout à nous orienter et à reconnaître la direction des ondes sono-

res. Diderot raconte qu'un aveugle qui se disputait avec son frère prit un objet qu'il avait sous la main et le jeta très bien à la tête de l'autre ; l'oreille avait guidé son bras.

Les aveugles ont en général l'ouïe très fine, parce qu'elle leur remplace jusqu'à un certain point la vue. Itard a imaginé, pour apprécier la finesse de l'ouïe, un instrument qu'il appelle *acoumètre*. C'est un anneau de cuivre suspendu à un fil, sur lequel frappe la boule d'un petit pendule que l'on écarte de la verticale d'une quantité toujours la même. On mesure la distance à laquelle le son cesse d'être entendu. Dans son voyage autour du monde, Freycinet s'est servi de cet appareil pour étudier l'ouïe des sauvages.

Chez les oiseaux nocturnes et chez les animaux peureux, comme le lièvre, l'oreille externe est très développée.

Les oreilles des animaux inférieurs sont incomplètes. Chez les poissons, c'est la caisse du tympan qui manque ; les fenêtres ronde et ovale sont à fleur de tête.

Les articulés n'offrent pas d'appareil auditif apparent. Parmi les mollusques, on n'en connaît qu'aux céphalopodes : il s'y réduit à l'expression la plus simple : vestibule et nerf acoustique.

XV

MUSIQUE ET SCIENCE

Principe de la musique. — Sauveur. — Euler. — Rameau. — Helmholtz. — Consonance et dissonance expliquée par les battements. — Accords. — Modes majeur et mineur.

Le dédain avec lequel la plupart des musiciens repoussent toute tentative d'invasion des sciences exactes dans leur domaine est jusqu'à un certain point justifié. Le secours que les mathématiques avaient apporté à la science musicale se réduisait encore naguère à fort peu de chose ; à peine avait-on indiqué quelques vagues analogies qui n'expliquaient rien. On tournait dans un cercle vicieux ; le plaisir de l'oreille était érigé en principe et faisait la base de tous les systèmes ; il était à la fois le but et le point de départ.

On savait ceci : les accords consonants correspondent à des rapports de nombres entiers. Les pythagoriciens tournaient et retournaient ce thème sans en tirer autre chose que des aphorismes sur l'harmonie du monde et sur la puissance occulte des nombres. On a voulu retrouver les sept notes de la gamme jusque dans

les mouvements des corps célestes, et le grand Kepler lui-même s'abandonnait volontiers à des spéculations mystiques sur cette matière.

Les idées de Sauveur sont plus claires[1]. Voici comment il s'exprime en 1701 : « L'âme, dit-il, par sa nature, aime en même temps, et les perceptions simples, parce qu'elles ne la fatiguent point, et les perceptions variées, parce qu'elles lui épargnent l'ennui de l'uniformité. Toute variété qui plaît à l'âme est donc renfermée dans certaines bornes ; il faut qu'elle soit en deçà du point où elle deviendrait difficile à apercevoir, confuse, trop mêlée, trop compliquée... » Il explique ensuite que les accords sont agréables par les rencontres plus ou moins fréquentes des vibrations. Quand ces rencontres deviennent déjà rares, comme dans les tierces, où elles n'ont lieu qu'une fois pour cinq ou six vibrations, les perceptions sont moins simples, mais cependant encore agréables précisément parce qu'elles sont un peu variées, les contrastes faisant mieux ressortir les concordances. Mais il y a un terme où finit l'agrément de la variété, et ce terme est donné par le rapport 5 : 6. Sauveur fait ensuite remarquer que les accords ne donnent pas de battements et que les dissonances en donnent.

L'*Histoire de l'Académie* (année 1700, p. 143) renferme encore à ce sujet le passage suivant : « Les battements ne plaisent pas à l'oreille, à cause de l'inégalité du son, et l'on peut croire avec beaucoup d'apparence que ce qui rend les octaves si agréables, c'est qu'on n'y entend jamais de battements. En suivant cette idée,

1. *Système général d'acoustique.* Mém. de l'Acad. royale de Paris pour 1701. — Voir aussi le mémoire de Lagrange sur *la Nature et la propagation du son* (1759).

on trouve que les accords dont on ne peut entendre les battements sont justement ceux que les musiciens traitent de consonances, et que ceux dont les battements se font sentir sont les dissonances, et que, quand un accord est dissonance dans une certaine octave et consonance dans une autre, c'est qu'il bat dans l'une et qu'il ne bat pas dans l'autre ; aussi est-il traité de consonance imparfaite. Si cette hypothèse est vraie, elle découvrira la véritable source des règles de la composition, inconnue jusqu'à présent à la philosophie, qui s'en remettait presque entièrement au jugement de l'oreille. Ces sortes de jugements naturels, quelque bizarres qu'ils paraissent quelquefois, ne le sont point. ils ont des causes très réelles, dont la connaissance appartient à la philosophie, pourvu qu'elle s'en puisse mettre en possession. »

Sauveur (ou plutôt Fontenelle, l'historien de l'Académie) ajoute plus tard, en revenant sur cette idée, que le terme de l'agrément des accords n'a peut-être pas été fixé par la nature, et que ce qu'on appelle une oreille fine est peut-être le résultat d'un long usage, d'anciennes habitudes et de préjugés arbitraires aussi bien que d'une faculté innée ; ce qui explique l'extrême différence du goût des nations pour la musique. Nous verrons bientôt que Sauveur approcha beaucoup de la vérité.

Dans la première moitié du dix-huitième siècle, vers 1740, le grand mathématicien Léonard Euler s'efforce à son tour d'expliquer les rapports des intervalles musicaux par des considérations tirées de la psychologie. Voici son raisonnement : Ce qui nous plaît, c'est toujours ce qui, à notre sentiment, possède une certaine perfection, et dans toute chose où il y a de la per-

fection, il y a nécessairement aussi de l'ordre, c'est-à-dire une loi quelconque. Un chant nous plaira donc si nous reconnaissons l'ordre des sons qui le composent, et il nous plaira d'autant plus qu'il nous sera plus facile de saisir cet ordre. Or, dans les sons il y a deux choses où l'ordre peut se manifester : l'une est la hauteur des sons représentée par le grave ou l'aigu, l'autre est la durée. La hauteur se mesure par la vitesse des vibrations, la durée par le temps durant lequel un son se fait entendre. L'ordre dans la durée est le rythme ou la mesure; l'ordre dans la hauteur consistera dans une proportion simple entre les vibrations. Le degré d'agrément de ces proportions, c'est-à-dire des intervalles musicaux, dépend de leur simplicité, car l'oreille les apprécie d'autant plus facilement qu'ils sont exprimés par des nombres plus simples, et le plaisir est plus grand lorsqu'il nous coûte moins. En développant ces principes, Euler parvient à établir les règles de l'harmonie.

Ce qui manque à sa théorie, c'est une base expérimentale certaine. Car il faut le dire, rien ne nous autorise à admettre que l'oreille puisse juger des rapports de vibrations qui ne durent que des millièmes de seconde. Les observations des astronomes montrent que l'oreille sépare tout au plus deux battements de pendules dont l'intervalle est d'un cinquantième de seconde. Comment supposer qu'elle puisse apprécier numériquement les rapports de deux nombres de vibrations tels que 5000 et 5050, par exemple, où il y a respectivement 100 et 101 vibrations par seconde? Et pourtant elle reconnaît facilement ce rapport en tant qu'intervalle musical : il ne diffère pas beaucoup d'un comma.

En 1726, Rameau donna une autre théorie, que

d'Alembert ne dédaigna pas de prendre sous son égide. Elle semble, au premier abord, pouvoir rendre raison du plaisir que nous cause la inusique. Il est très curieux de voir de quelle manière le célèbre artiste s'y est pris pour découvrir ce qu'il appelle le *principe de l'harmonie*.

« Je compris d'abord, dit-il, qu'il fallait suivre dans mes recherches le même ordre que les choses avaient entre elles ; et comme, selon toute apparence, on avait eu du chant avant que d'avoir eu de l'harmonie, je me demandai comment on était parvenu à obtenir du chant.

« Éclairé par la méthode de Descartes, que j'avais heureusement lue, et dont j'avais été frappé, je comment çai par descendre en moi-même; j'essayai des chants, à peu près comme un enfant qui s'exercerait à chanter ; j'examinai ce qui se passait dans mon esprit et dans mon organe, et il me sembla toujours qu'il n'y avait rien du tout qui me déterminât, quand j'avais entonné un son, à entonner, entre la multitude de sons que je pouvais lui faire succéder, l'un plutôt que l'autre. Il y en avait, à la vérité, certains pour lesquels l'organe de la voix et mon oreille me paraissaient avoir de la prédilection, et ce fut là ma première perception ; mais cette prédilection me parut une affaire d'habitude. J'imaginai que dans un autre système de musique que le nôtre, avec une autre habitude de chant, la prédilection de l'organe et du sens aurait été pour un autre son ; et je conclus que, puisque je ne trouvais en moi-même aucune bonne raison pour justifier cette prédilection, et la regarder comme naturelle, je ne devais ni la prendre pour principe de mes recherches, ni même la supposer dans un autre homme qui n'aurait point l'habitude de chanter ou d'entendre du chant. »

Il constate cependant que les sons qui lui avaient semblé se succéder le plus naturellement étaient la quinte et la tierce, ou les sons qui correspondent aux rapports de 2 à 3 et de 4 à 5. Mais cette simplicité de rapport ne lui paraît constituer qu'une sorte de convenance, insuffisante pour rendre raison d'un phénomène aussi net que celui qu'il s'agit d'expliquer.

« Je me mis, poursuit-il, à regarder autour de moi et à chercher dans la nature ce que je ne pouvais tirer de mon propre fond, ni aussi nettement, ni aussi sûrement que je le désirais. La recherche ne fut pas longue. Le premier son qui frappa mon oreille fut un trait de lumière. Je m'aperçus tout d'un coup qu'il n'était pas un, ou que l'impression qu'il faisait sur moi était composée ; « voilà, me dis-je sur-le-champ, la différence du *bruit* et du *son*. Toute cause qui produit sur mon oreille une impression une et simple, me fait entendre du *bruit ;* toute cause qui produit sur mon oreille une impression composée de plusieurs autres, me fait entendre du *son*. J'appelai le son primitif ou générateur, *son fondamental*, ses concomitants, *sons harmoniques*. »

Il reconnaît ensuite que les sons harmoniques sont très aigus et très fugitifs, de sorte qu'ils ne doivent pas frapper également une oreille musicale et une oreille qui ne l'est pas. Enfin il s'assure que le cortège du son fondamental se compose de sa douzième et de sa dix-septième, c'est-à-dire de l'octave de la quinte et de la double octave de la tierce majeure. Or, comme il sait par expérience, dit-il, que l'octave n'est qu'une *réplique*, il trouve tout naturel que son organe et son imagination rabaissent les harmoniques à leurs moindres degrés, et qu'ainsi sa préoccupation s'est fixée sur la tierce et sur la quinte du son fondamental, et non sur

leurs répliques, lorsqu'il a cherché les sons que l'oreille lui suggérait après le son fondamental. Ainsi, la résonance multiple du corps sonore devient la base sur laquelle s'élève le système musical. Rameau en déduit la formation de l'échelle diatonique et les principales règles de l'harmonie. Mais son imagination exubérante l'entraîne plus tard jusqu'à vouloir tirer de la même source le principe de la géométrie, et c'est ici que d'Alembert, qni a eu le mérite de développer et de simplifier le système de Rameau, s'est vu dans l'obligation de placer son *veto* et de circonscrire nettement la portée de la découverte du musicien. D'Alembert ne cesse de répéter que la démonstration que Rameau prétend avoir donnée du principe de l'harmonie n'en est pas une, et qu'il entrera toujours dans la théorie des phénomènes musicaux une sorte de métaphysique qui y porte son obscurité naturelle.

Le jugement de d'Alembert sur le système de Rameau prouve assez que l'illustre mathématicien en connaissait parfaitement les côtés faibles ou, pour mieux dire, l'insuffisance. En effet, il ne suffit point de dire que l'octave est « une réplique, » pour rendre compte du rôle capital que cet intervalle joue dans la musique; et, d'un autre côté, le phénomène de la résonance harmonique n'a point la généralité que Rameau lui attribue. Un grand nombre de corps sonores rendent, en réalité, des sons simultanés parfaitement dissonants. Il n'est donc pas juste de poser en principe que les accords dérivent de la résonance *naturelle ;* et cela fût il exact, rappelons-nous que dans la nature le laid prend tout autant de place que le beau ; ce qui prouve qu'une chose peut être naturelle et désagréable.

Il faut donc encore avouer que cette théorie manque

d'une base rationnelle, puisqu'elle n'explique en aucune manière l'origine des dissonances. Néanmoins, on est frappé d'admiration en voyant ce que Rameau a su tirer de données si incomplètes, et on peut dire, sans crainte d'exagérer, qu'il a inauguré une ère nouvelle dans la théorie de la musique.

Le célèbre Tartini publia, en 1754, un traité d'harmonie dans lequel il prit pour point de départ les *sons résultants*, qu'il croyait avoir découverts : il les avait observés lorsqu'il jouait sur deux cordes à la fois. Tartini appelle les sons de la série 1, 2, 3... les *monades harmoniques*, du concours desquelles résulte un son; toute l'harmonie, dit-il, est comprise entre la monade ou l'unité composante, et le son plein, ou l'unité composée. Il énumère ensuite les sons résultants des intervalles musicaux, en se trompant toujours d'octave, et il trouve qu'on peut ranger les divers intervalles de manière qu'ils donnent tous le même son résultant, que l'on peut dès lors considérer comme leur base commune, etc., etc.

Depuis ce temps, la théorie de la musique ne sortait pas d'un cercle d'idées complètement étrangères à la physique et à la physiologie ; le plus souvent les auteurs de *systèmes* s'égaraient dans de véritables spéculations mystiques. Le philosophe allemand Herbart n'a pas été le moins loin dans cette voie. Pour lui, deux sons quelconques éveillent toujours dans l'esprit deux idées qui exercent l'une sur l'autre à la fois une attraction et une répulsion. Dans l'âme de la quinte, la haine vient de terrasser l'amour; dans la tierce majeure, les deux puissances s'observent dans une neutralité armée. La conclusion la plus curieuse, c'est que la gamme tempérée est celle qui satisfait le plus une oreille musicale.

Il faut ajouter qu'Herbart était lui-m dont sicien.

Les Traités d'harmonie qui, de n base à l'enseignement musical ne pliquer les effets des combinaisons crées. Ils posent en principe qu'il des affinités, des attractions et des répulsions l'oreille constate et dont le musicien doit tirer parti.

En 1863, parut en Allemagne un livre qui fit sensation. C'est la *Théorie de la perception des sons*, d'Helmholtz[1]. L'auteur ramène enfin à des phénomènes physiques, susceptibles d'être soumis au calcul, les rapports secrets de sympathie et d'antipathie qui existent entre les sons naturels et s'efforce de mettre en évidence la cause des sensations qu'ils nous font éprouver. A la vérité les principes d'où il part ne sont pas nouveaux. L'explication du timbre avait été déjà entrevue par Biot et par d'autres physiciens. Sauveur avait déjà reconnu dans les battements le principe de la dissonance. Mais M. Helmholtz a eu le mérite de développer la théorie de ces phénomènes et de l'asseoir solidement sur un ensemble d'expériences méthodiques et précises.

Essayons de le suivre dans ses déductions, et occupons-nous d'abord des battements. La sensation désagréable qu'ils nous font éprouver s'explique aisément. Toute excitation intermittente d'un nerf nous fatigue. On sait combien est désagréable une lumière tremblotante, comme celle d'une flamme agitée par le vent. Une lumière forte, mais tranquille, émousse bientôt l'irritabilité de la rétine, comme une pression continue en-

1. *Théorie physiologique de la musique*, par H. Helmholtz, traduite en français par G. Guéroult. Paris, 1868. Masson.

gourdit la peau; un élairage intermittent, une pression rapide et souvent répétée, permettent au contraire aux nerfs de reprendre incessamment leur sensibilité primitive et deviennent, pour cette raison, une source de souffrance. Le chatouillement surexcite l'épiderme. De même, un son intermittent irrite l'oreille, et c'est pour cela que les battements sont un principe de dissonance, comme Sauveur l'avait déjà deviné.

En étudiant les battements, M. Helmholtz a d'abord constaté que le degré de raucité qu'ils donnent à un intervalle musical ne dépend pas uniquement de leur fréquence; ils deviennent moins irritants dans les octaves basses, où le même nombre de battements correspond à un intervalle plus large. Ainsi, la seconde mineure si_3 ut_4 est très dissonante, tandis que la quinte *ut sol* est une consonance, et pourtant ces deux intervalles donnent l'un comme l'autre 33 battements par seconde. Cette circonstance s'explique par l'écartement plus grand des fibres qui répondent à un intervalle plus large; le *sol* n'agit plus sur la fibre accordée pour l'*ut*, et l'*ut* n'ébranle plus la fibre *sol*, d'où il suit que la résonance est ici impuissante à réunir les deux notes dans la même fibre et à y faire naître des battements. Au contraire les notes *si* et *ut* font résonner un grand nombre de fibres en commun, ce qui fait que leurs battements deviennent sensibles pour le nerf acoustique [1].

Lorsqu'on observe des battements avec deux sons dont l'intervalle est très grand, le phénomène est dû aux harmoniques, ou bien aux sons résultants [2]. Ainsi,

1. D'après les expériences de M. Kœnig, ces différences ne tiendraient qu'à ce fait, que les sons graves ont en général beaucoup moins d'intensité que les sons aigus.

2. Les choses se passent du moins comme s'il en était ainsi.

l'ut_2, harmonique d'*ut*, battra avec toutes les notes dont il se rapproche, par exemple avec le $ré_2$, ou avec le *si*, lors même que ces notes se feraient entendre comme harmoniques d'un autre son fondamental. Deux sons, trop éloignés pour s'atteindre directement, peuvent donc encore se faire la guerre par l'intermédiaire de leurs satellites; ainsi le mi_3, harmonique d'*ut*, battra avec le $mi\flat_3$ harmonique du $la\flat$. Il peut même arriver bataille sous le même toit; deux harmoniques de la même note, quand ils se trouvent trop serrés, se prennent à partie; ainsi les harmoniques 8 et 9, ou 9 et 10, qui ne diffèrent entre eux que d'un ton, battent toujours et troublent l'harmonie intestine du timbre où ils sont un peu prononcés; leur présence explique la strideur des sons de la trompette ou des voix de basse forcées.

Quand deux sons, d'un timbre quelconque, sont exactement à l'octave, les harmoniques du plus aigu se superposent chacun à un harmonique du plus grave.

UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
		|		|		|		|		|	...
UT_3		2		4		6		8		10	...
	ut	ut_2	sol_2	ut_3	mi_3	sol_3	$la\sharp_3$	ut_4	$ré_4$	mi_4	.

Dès lors plus de battements; mais pour peu que l'accord se trouble, nous en sommes avertis par un grand vacarme que produisent les harmoniques dédoublés. L'ut_2 battra avec l'ut_2 altéré, l'ut_3 avec l'ut_3 faux, et ainsi de suite. Voilà pourquoi l'octave est l'intervalle consonant par excellence, et celui dont l'oreille apprécie la justesse avec le plus de sûreté. Les battements *virtuels* ou éventuels des harmoniques le caractérisent par leur énergie; le plus léger désaccord se trahit aussitôt par une grande cacophonie. Les autres consonances sont

bien moins caractérisées, comme on va voir. Prenons la douzième 1 : 3; voici l'ordre des deux cortèges :

UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
			|			|			|	
SOL_2			3			6			9	...
	ut	ut_2	sol_2	ut_3	mi_3	sol_3	...	ut_4	$ré_4$	...

La coïncidence des harmoniques a encore lieu ici, mais elle est moins importante; les battements virtuels sont moins sensibles, la consonance est donc moins précisée.

Les autres consonances, quinte, quarte, tierce, etc., renferment déjà des éléments de dissonance; ici les harmoniques ne se superposent qu'en partie; il reste un levain de discorde.

Voici par exemple, la quinte :

UT	2		4	6	8		10	12	...
				|				|	
SOL		3		6		9	....	12	
	ut sol		ut_2	sol_2	ut_3	$ré_3$	mi_3	sol_3	...

Le sol_2 et le sol_3 sont à la fois harmoniques d'*ut* et de *sol*, et coïncident quand la quinte est juste; mais le $ré_3$, du cortège de SOL, peut battre avec l'ut_3 et le mi_3 du cortège d'UT. La consonance de la quinte n'est donc pas absolument pure; de plus, elle est moins caractérisée que l'octave, car une quinte fausse fait seulement battre des harmoniques de même rang que ceux qui battent dans une douzième fausse.

On peut faire des remarques analogues sur les autres accords consonants. Plus il y a d'harmoniques peu élevés qui coïncident, plus l'intervalle est pur et mieux, il est caractérisé par les battements éventuels de ces harmoniques.

Dans les intervalles où il existe des harmoniques susceptibles de troubler l'accord, il faut encore tenir compte du rapprochement plus ou moins étroit de ces notes, car les battements seront d'autant plus lents qu'elles seront plus voisines. Nous avons déjà dit que l'impression était surtout désagréable aux environs de trente-trois battements par seconde; des battements beaucoup plus rapides cessent d'être sensibles; des battements très lents, loin de blesser l'oreille, donnent à la musique quelque chose de solennel, ou bien une expression plus mouvementée, tremblante, émue, comme celle du trémolo de la voix [1]. Il s'ensuit qu'un intervalle sera d'autant plus dissonant qu'il offrira un plus grand nombre d'harmoniques peu élevés qui pourront produire *des battements d'une certaine rapidité*.

D'après ces principes, il est facile de calculer *a priori* le degré de pureté des différents intervalles, considérés dans toutes les parties de l'échelle musicale. M. Helmholtz appelle consonances *absolues* ou franches les intervalles où l'une des deux notes données coïncide avec un son partiel de l'autre, car, dans ce cas, il y a aussi coïncidence entre tous les harmoniques respectifs. C'est à cette catégorie qu'appartiennent l'unisson, les octaves successives, la douzième, la dix-septième, etc. Les intervalles qui viennent immédiatement après, au point de vue de la pureté, sont d'abord la quinte, puis la quarte, que l'on peut encore qualifier de consonances parfaites; la sixte et la tierce majeures sont des consonances moyennes ; la tierce et la sixte mineures

1. On trouve en effet dans les orgues modernes un jeu d'anches accouplées qui battent. L'effet du registre dit *unda maris* repose aussi sur les battements lents.

Fig. 116.

ne sont plus que des consonances imparfaites.

Les battements des tierces sont déjà très sensibles pour les notes graves de l'échelle; aussi ne les a-t-on admises, à titre de consonances imparfaites, que depuis la fin du douzième siècle. L'emploi de la tierce et de la sixte mineures n'est guère justifié que par les nécessités de la construction des accords.

Si les intervalles sont redoublés, la quinte et la tierce majeure s'améliorent (elles se changent en douzième et en dixième majeure); au contraire, la quarte, la tierce mineure et les sixtes deviennent plus dissonantes.

M. Helmholtz a essayé de mettre en évidence ces phénomènes et les lois qui les règlent au moyen d'une figure qui représente par une courbe très accidentée le degré relatif de dissonance de deux notes quelconques du violon, calculé d'après l'intensité et la fréquence des battements des sons supérieurs de ces notes, en supposant que l'effet est maximum pour 33 battements par seconde (fig. 116). Sur une ligne droite par laquelle est représentée une note qui s'éloigne de

l'ut_3, en montant par degrés insensibles jusqu'à la double octave ut_3, on voit s'élever la Cordillère du déplaisir. Des vallées profondes sont indiquées aux endroits de l'unisson, de la quinte, de l'octave, de la douzième et de la double octave ; le Chimborazo de la dissonance existe tout près de l'unisson où le plus léger désaccord produit les battements les plus sensibles; des aspérités plus ou moins prononcées caractérisent les autres régions dissonantes, et des dépressions plus ou moins fortes les diverses consonances.

L'influence des sons résultants est de tout point analogue à celle des sons supérieurs ou harmoniques. Lors de la réunion de deux sons accompagnés de leurs harmoniques, les premiers sons différentiels ne produisent que des battements identiques à ceux des harmoniques, et comme ils sont, en général, beaucoup plus faibles que ces derniers, leur considération est peu importante pour la pratique, où nous n'avons affaire qu'à des sons musicaux doués d'harmoniques ; mais dès qu'il s'agit de sons simples, les battements des sons résultants peuvent nous aider à rendre compte des dissonances. Ainsi, le premier son différentiel de l'octave coïncide avec la plus grave des deux notes données ; il peut donc battre avec celle-ci dès que l'accord est troublé, et il contribue ainsi à caractériser l'octave.

Il est vrai que, d'après ce qui a été dit plus haut, deux sons simples qui forment un intervalle consonant, légèrement altéré, battent encore comme s'ils étaient pourvus d'harmoniques; d'où il suit que, même dans ce cas, les intervalles consonants ne cessent pas d'être caractérisés (toute abstraction faite de leurs sons résultants). Mais, ils le sont moins nettement que lorsque les harmoniques interviennent par leur présence réelle.

Les tierces deviennent déjà indécises lorsqu'on n'emploie que des sons simples. C'est la vraie raison qui fait que les sons dépourvus d'harmoniques sont impropres à la musique d'harmonie; on ne peut s'en servir que pour renforcer des sons plus riches. Cette remarque s'applique, par exemple, aux tuyaux d'orgue larges et fermés. Lorsqu'on joue sur l'orgue un morceau de musique dans le registre fermé, il n'a plus ni caractère ni énergie ; l'absence des harmoniques est cause que les consonances se distinguent à peine des dissonances, et cette indécision donne à la musique quelque chose de mou et de faible qui fatigue à la longue. Le timbre de la flûte contient déjà, outre le son fondamental, l'octave aiguë et quelquefois la douzième; les intervalles de l'octave et de la quinte y sont déjà un peu mieux caractérisés, les tierces et les sixtes ne le sont encore que très faiblement. Aussi connaît-on ce dicton : que la pire chose au monde, après une flûte, ce sont deux flûtes. Cet instrument devient cependant très utile lorsqu'il se joint à d'autres qui ont plus d'énergie. On peut dire la même chose de l'harmonium à diapasons.

Les qualités des intervalles musicaux varient donc nécessairement avec le timbre des instruments.

L'analyse du timbre des instruments les plus répandus a montré que l'oreille aime surtout les sons dans lesquels les deux premiers harmoniques (octave et douzième) sont fortement accentués, les deux suivants modérés, et les autres de moins en moins sensibles. En partant de là, il est facile d'expliquer l'effet particulier de chaque instrument et d'établir *a priori* une foule de règles pratiques connues des musiciens.

On le voit, la considération des battements permet

d'expliquer le rôle des nombres entiers dans la fixation des intervalles musicaux. La loi de Fourier, en vertu de laquelle tout mouvement sonore est une somme de notes simples, devient ainsi la véritable base du contre-point, puisque les consonances dérivent de la superposition des sons partiels, et les dissonances de leur antagonisme.

Il nous reste à parler des sons au point de vue de l'effet qu'ils produisent lorsqu'ils sont réunis en musique. Ce sujet empiète sur le domaine de l'esthétique, où nous n'avons plus, pour nous guider, des principes fixes et invariables comme ceux des sciences purement physiques. Les échelles musicales, les modes, etc., se sont développés pas à pas, à travers les siècles, et les changements que le goût des différentes nations y a apportés sont une preuve suffisante du peu de stabilité de leurs fondements. La science du contre-point se fonde, en partie du moins, sur des lois essentiellement perfectibles, et il serait téméraire d'affirmer qu'elle est arrivée au dernier terme de son développement.

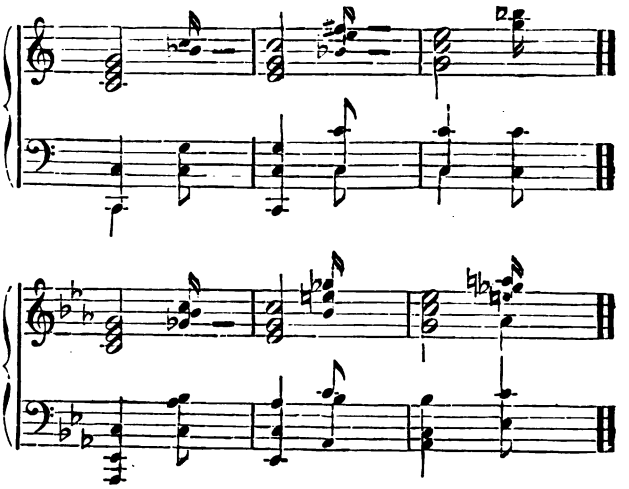
Toutefois, ici encore, nous retrouvons quelques lois générales qui semblent avoir guidé les artistes à leur insu, et qui dérivent naturellement de celles que nous avons établies précédemment. Elles font comprendre la nécessité philosophique des règles auxquelles a conduit un tâtonnement séculaire.

Ainsi la formation des accords multiples repose sur les mêmes principes que celles des intervalles consonants. Il faut que les trois intervalles entre les trois notes qui composent un accord triple soient séparément consonants pour que l'accord le soit aussi. En considérant les intervalles qui existent dans les différents

accords, on peut les classer par degrés de consonance.

La différence des modes majeur et mineur résiderait, d'après M. Helmholtz, dans les sons résultants qui naissent de la combinaison des trois notes[1]. Dans les accords majeurs, les sons résultants ne sont que des répétitions des mêmes notes dans les octaves plus graves. Dans les accords mineurs, il n'en est plus de même ; les sons résultants y sortent de l'harmonie et forment entre eux des accords majeurs qui accompagnent en sourdine l'accord mineur. Cette intervention d'un élément étranger, et peut-être aussi les battements très faibles des sons résultants de deuxième ordre, donnent aux accords mineurs quelque chose de voilé et d'indécis que tous les musiciens ont senti sans pouvoir s'en rendre compte.

Dans le tableau qui suit, les accords majeurs et mineurs sont figurés par des blanches, les sons résul-



[1] ni avait déjà dit quelque chose d'analogue.

tants des notes fondamentales par des noires, les sons résultants dus à la combinaison de notes fondamentales et d'harmoniques par des croches et par des doubles croches. Une pause placée après une note signifie que cette note est un peu plus élevée que le son qu'elle doit représenter.

Si nous passons à la réunion mélodique des sons, nous trouvons que la mélodie repose, comme l'harmonie, sur le phénomène des sons supérieurs, en ce sens que ce sont ces derniers qui déterminent *l'affinité* des sons entre eux, comme l'affinité des accords résulte des notes qui leur sont communes.

La mélodie est une suite de sons qui se succèdent d'une manière agréable à l'oreille. D'après Rameau et d'Alembert, elle naît directement de l'harmonie; l'on doit en chercher les effets dans l'harmonie, exprimée ou sous-entendue, ou plus particulièrement dans la basse fondamentale sous-entendue. Mais comme le chant homophone a existé bien avant la musique polyphone ou musique d'harmonie, l'histoire nous force à chercher pour la mélodie une origine indépendante.

Remarquons d'abord que la mélodie est un mouvement qui se traduit par le changement de hauteur des notes; elle peut imiter toutes les allures diverses des mouvements mécaniques. Mais l'esprit ne pourrait apprécier ni sentir ces nuances, si la progression n'avait pas lieu par degrés d'une valeur définie, c'est-à-dire par intervalles de tons ou demi-tons, et dans un rythme déterminé. La mesure nous aide à diviser le temps, la progression par tons et demi-tons nous permet de fractionner la hauteur des notes, et c'est ainsi que nous comprenons le mouvement par le rythme et par la mélodie. Les sensations que nous fait éprouver le spec-

tacle d'une eau agitée où les vagues se succèdent à temps égaux, sont d'une nature tout à fait analogue. Dans la voix du vent, les notes se fondent sans faire de saut ; aussi nous produit-elle une impression pénible et confuse, à cause de l'absence de toute mesure ou division. La musique, au contraire, a un étalon pour mesurer le mouvement ascendant et descendant des sons, et cet étalon c'est la gamme.

Mais quelle est la raison qui a fait adopter pour la gamme les notes dont elle se compose aujourd'hui ? Pourquoi y rencontrons-nous tout d'abord l'octave, la quinte, la quarte, les tierces ? La réponse est facile, après ce que nous avons dit des sons partiels ou harmoniques. Le tableau suivant représente les rencontres des harmoniques des intervalles consonants.

Tonique (1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Octave (2)	—	2	—	4	—	6	—	8	—
Douzième (3)	—	—	3	—	—	6	—	—	9
Quinte ($\frac{3}{2}$)	—	—	3	—	—	6	—	—	9
Quarte ($\frac{4}{3}$)	—	—	—	4	—	—	—	8	—
Tierce ($\frac{5}{4}$)	—	—	—	—	5	—	—	—	—
Tierce ($\frac{6}{5}$)	—	—	—	—	—	6	—	—	—

L'octave, avec son cortège d'harmoniques, étant contenue dans le timbre de la tonique, il est clair qu'en montant d'octave on ne fait que répéter une partie, une fraction de la tonique. Voilà pourquoi il sera permis de dire, avec Rameau, que l'octave aiguë est une simple réplique, ou mieux, un rappel, un souvenir de la tonique

La douzième, étant le 3e son partiel de la tonique, est également annoncée par celle-ci, mais moins complètement que l'octave, car elle ne reproduit que les harmoniques 3, 6,... de la tonique. En l'abaissant

d'une octave, nous avons la quinte, dont le 2me son partiel reproduit l'harmonique 3 de la tonique, le 4me l'harmonique 6 de celle-ci, et ainsi de suite. La quinte est donc encore un écho partiel de la tonique, mais en même temps elle apporte des notes nouvelles qui ne sont pas comprises dans cette dernière ; elle a donc moins d'affinité pour la tonique que l'octave ou la douzième. L'affinité de la quarte est encore moindre, car ici ce n'est que le 3me son partiel qui coïncide avec le 4me de la tonique. Aussi est-ce d'abord par les quintes que s'accompagnait le dessus du chant polyphone, dans le moyen âge. Les tierces et les sixtes rappellent la tonique d'une manière encore bien moins sensible ; elles n'ont été introduites dans l'usage musical qu'à une époque où l'harmonie avait commencé à se développer.

M. Helmholtz appelle affinité du premier degré celle de deux sons qui ont au moins un harmonique commun ; affinité du deuxième degré celle de deux sons qui ont chacun un harmonique commun avec un troisième son. En partant de là, il réussit à construire d'une manière rationnelle l'échelle diatonique avec des notes qui ont pour la tonique une affinité au premier ou au deuxième degré.

La parenté directe de la tonique *ut* se compose des notes

ut, *sol*, *fa*, *la*, *mi*, *mi*♭,

si nous nous arrêtons aux six premiers harmoniques, les autres étant trop faibles pour caractériser l'affinité. Nous avons alors les gammes :

ut — — *mi* — *fa* — *sol* — *la* — — ut_2

ou bien :

ut — — *mi*♭ — *fa* — *sol* — *la* — — ut_2

car on ne saurait faire entrer dans la même gamme deux notes aussi rapprochées que *mi* et *mi*♭. Pour fractionner les deux intervalles trop grands qui existent dans cette série, il faut recourir à la parenté du *sol*, qui se compose des notes *ut*, *ré*, *mi*♭, *si*, ut_2. Le *ré* et le *si* se trouvent donc liés à l'*ut* par une affinité du second degré ; en les intercalant dans les gammes ci-dessus, on obtient la gamme diatonique

ut — *ré* — *mi* — *fa* — *sol* — *la* — *si* — ut_2

qui devient la gamme mineure ascendante si nous mettons *mi*♭ à la place de *mi*. Le *ré* que l'on prendrait dans la parenté du *fa* différerait d'un comma du *ré* déterminé par le *sol*. Ces exemples suffisent pour faire comprendre la marche suivie par M. Helmholtz.

En étudiant les règles de l'harmonie, on s'aperçoit ensuite que les accords, considérés comme des sons complexes, présentent entre eux les mêmes relations d'affinité que les notes de la gamme, par suite de la coïncidence de quelques-unes de leurs notes. Le rôle capital de la tonique dans la musique moderne, ou ce que M. Fétis appelle le principe de la *tonalité*, s'explique aussi par la nature des sons supérieurs de la tonique. Ces principes si clairs et si simples ont permis à M. Helmholtz de déduire, de considérations pour ainsi dire mathématiques, les règles fondamentales de la composition.

Toutefois, il faut bien l'avouer, le dernier mot de la théorie de la musique n'est pas dit ; toutes les déductions de M. Helmholtz ne sont pas hors de conteste. Ainsi, M. A. von Œttingen a critiqué avec quelque raison l'explication que M. Helmholtz donne de la différence des modes majeur et mineur, car le phénomène

des harmoniques est quelquefois bien peu apparent. M. d'Œttingen cherche cette différence dans les principes réciproques de la *tonicité* et de la *phonicité*. La tonicité d'un intervalle ou d'un accord consiste dans la possibilité de le considérer comme un groupe d'harmoniques d'un même son fondamental. C'est ainsi que l'accord majeur se compose avec les harmoniques 4, 5, 6 de la *tonique* ou basse fondamentale 1. La phonicité serait la propriété inverse d'avoir un harmonique en commun : l'accord mineur $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$ a le son 1 pour harmonique commun ou *phonique*. L'accord majeur a pour phonique 60, l'accord mineur a pour tonique $\frac{1}{60}$.

En développant ce dualisme, l'auteur obtient la construction parallèle des modes majeur et mineur. Mais nous devons borner là ces détails, qui peut-être déjà fatiguent le lecteur.

S'il est possible ainsi d'établir *a priori* les lois les plus importantes de la musique, quelque grand que soit le résultat au point de vue de la philosophie de l'art, il ne s'ensuit pas que la connaissance de ces lois suffise pour devenir musicien. Il faut ici répéter ce que d'Alembert disait dans la préface de son livre sur la musique : « C'est à la nature à faire le reste ; sans elle, on ne composera pas de meilleure musique pour avoir lu ces Éléments, qu'on ne fera de bons vers avec le Dictionnaire de Richelet. Ce sont, en un mot, des éléments de musique, et non des éléments de génie que je prétends donner. »

Dans les œuvres d'art que nous admirons, nous devinons instinctivement une loi secrète, à laquelle l'artiste a obéi, mais à son insu. C'est dans ce sens qu'il faut prendre le mot si souvent cité de Leibniz [1].

1. Musica est exercitium arithmeticæ occultum nescientis se numerare animi.

Quand la loi est tellement manifeste qu'elle saute aux yeux, nous sentons l'intention, le calcul, et l'œuvre nous laisse froids. C'est la loi inconsciente qui distingue l'œuvre d'art d'une production systématique et calculée ; il ne faut donc pas prétendre que la science puisse ou doive parvenir à découvrir et à mettre à nu tous les ressorts secrets de l'esprit créateur.

FIN

GRAVURES

5
9
11
11
11
11
13
15
16
17
24
24
24
24
24
27
35
40
41
55
57
63

27. Oreille de Denys. 67
28. Cornets acoustiques 69
29. Expériences du Bureau des longitudes. 77
30. Cornet hydracoustique. 80
31. Réflexion du son. 87
32. Écho heptaphone. 92
33. Écho à variations. 93
34. Écho hétérophone. 95
35. La villa Simonetta, près de Milan. 103
36. Ellipse. 101
37. Miroirs paraboliques. 105
38. Deux paraboles. 107
39. Réfraction du son. 109
40. Théâtre de Vitruve. 117
41. Résonateur 119
42. Arènes de Nîmes. 125
43. Salle parabolique. 126
44. Salle conique. 126
45. Coulisses triangulaires. 126
46. 47. Plans de théâtres. 127
48. Corde en vibration. 131
49. Tuyau vitré. 133
50. Trembleur de Trevelyan. 134
51. Expérience de Trevelyan. 135
52. Tube de Rijke. 136
53. Flammes de Schaffgotsch. 137
54. Flamme sensible. 139
55. Pendule. 140
56. Ondulations de l'eau. 142
57. Quart d'ondulation 143
58. Demi-ondulation. 143
59. Trois quarts d'ondulation. 143
60. Ondulation complète. 144
61. Ondulation de l'eau 144
62. Progression d'une vibration transversale. 145
63. Progression d'une vibration longitudinale. 147
64. Choc des billes élastiques. 149
65. Nœuds et ventres. 151
66. Corde vibrante. 153
67. 68. Vibrations transversales des cordes 153 154
69. 70. Vibrations longitudinales 154 155
71. Vibrations transversales des verges. 156

72. Diapason. 156
73. Serre-plaque. 157
74, 75. Figures de Chladni. 158 159
76. Chladni. 161
77. Flammes de Kœnig. 162
78. Méthode graphique. 163
79. Phonogrammes. 163
80. Phonautographe 164
81. Phonographe. 165
82. Tracés d'une voyelle 166
83. Vibrations comptées. 168
84. Le sonomètre. 169
85. Roue dentée de Savart. 173
86. Sirène de Cagniard de la Tour. 174
87. Soufflerie. 176
88. Vibration d'une tige carrée. 204
89. Calcidophone. 205
90. Méthode optique de M. Lissajous. 206
91. Unisson 1 : 1. 207
92. Octave 1 : 2. 207
93. Quinte 2 : 3. 208
94. Quarte 3 : 4. 208
95. Horloge à diapason. 210
96. 97. Mouvements périodiques. 214 215
98. 99. Mouvement pendulaire. 215 216
100. Son fondamental et octave. 220
101. Sistres des anciens. 233
102. Tuyau à clavette. 236
103. Sifflet. 237
104. Voyelles observées à l'aide des flammes de Kœnig. 241
105. Timbre des voyelles. 242
106. Appareil de Kœnig pour l'analyse du timbre. 243
107. Concordance. 251
108. Opposition. 251
109. Interférence. 252
110. Battements. 253
111, 112. Tracé des battements. 254 255
113. Influence du mouvement sur la hauteur des sons. 261
114. Oreille. 277
115. Osselets. 278
116. La Cordillère de la dissonance. 298

TABLE DES MATIÈRES

I. — LE SON DANS LA NATURE.

Bruit et son musical. — Statue de Memnon. — Grotte de Fingal. — Voix des animaux. — Langage des bêtes. — Oiseaux chanteurs. — Insectes. — Reptiles et poissons. — Vie nocturne des animaux dans les forêts. 1

II. — EFFETS DU SON SUR LES ÊTRES VIVANTS.

Puissance de la musique. — Légendes et anecdotes. — La musique comme remède. — Les tarentelles. — Effets de la musique sur les animaux. 22

III. — PROPAGATION DU SON DANS LES DIFFÉRENTS MILIEUX.

Effet du vide. — Propagation dans les gaz — dans l'eau — par le sol. — Expérience de M. Wheatstone. — Le stéthoscope. — On entend par les dents. — Le téléphone. — Le microphone. . . . 34

IV. — INTENSITÉ DU SON.

Circonstances qui font varier l'intensité des sons. — Intensité nocturne. — Portée des sons. — Transparence acoustique de l'atmosphère. — Le carré inverse de la distance. — Porte-voix. — Tuyaux acoustiques. — Cornet acoustique. 43

V. — VITESSE DU SON.

Mersenne. — Le Bureau des longitudes. — Le capitaine Parry. — M. Regnault. — Beudant. — Colladon et Sturm. — Biot. — Wertheim. — Distance semésurées par le son ; M. d'Abbadie. — Distance d'un orage. — Profondeur d'un lac par l'écho du fond 71

VI. — RÉFLEXION DU SON.

Lois de la réflexion. — Écho. — Écho polysyllabique. — Écho polyphone. — Écho hétérophone. — Réflexion et résonance. — Échos célèbres. — Réfraction du son. 86

VII. — RÉSONANCE.

Résonance. — Vases de Vitruve. — Tables d'harmonie. — Résonateurs. — La corde sensible. — Verres brisés par la voix. — Acoustique des églises et des salles de spectacle. 111

VIII. — LE SON EST UNE VIBRATION.

Origine mécanique des sons. — Cordes et tuyaux. — Instrument de Trevelyan. — Statue de Memnon. — Flammes chantantes. — Flammes sensibles. — Pendule. — Ondulations de l'eau. — Ondes progressives et ondes fixes. — Vibrations des cordes, des tiges, des plaques. — Figures de Chladni. — Figures de Kundt. — Flammes de Kœnig. — Méthode graphique. — Le phonographe. 130

IX. — HAUTEUR DES SONS.

Mesure des notes. — Chladni, Mersenne, Pythagore. — Sonomètre. — Roue dentée de Savart. — Sirènes. — Limites des sons perceptibles. — Étendue de l'échelle des sons musicaux. — Limites de la voix humaine. 167

X. — LES NOTES.

Rapports des notes. — Gamme. — Dénomination des notes. — Hymne de saint Jean. — Notation musicale. — Mode majeur et mode mineur. — Gamme tempérée. — Logarithmes acoustiques. — Galin et Chevé. — Le ton de chapelle. — Diapason normal. — Caléidophone. — Méthode optique de M. Lissajous. — Horloge à diapason. 185

XI. — LE TIMBRE.

Forme des ondes. — Vibrations pendulaires. — Sons simples et sons complexes. — Harmoniques. — Timbre de la voix et des instruments de musique. — Sons musicaux. — Voyelles. — Résonance multiple. — Analyse du timbre. 212

XII. — INTERFÉRENCES.

Battements. — Sons résultants. — Tonomètres de Scheibler et de Kœnig. — Influence du mouvement de la source. 248

XIII. — LA VOIX.

Organe de la voix. — Basse, ténor, alto, soprano. — Les voix célèbres. — Chant et voix parlée. — Voyelles et consonnes. — Ventriloques. 264

XIV. — L'OREILLE.

Oreille externe et interne. — Osselets. — Mécanisme de l'audition. — Inégalité des deux oreilles. — Jugement de la direction des sons 276

XV. — MUSIQUE ET SCIENCE.

Principe de la musique. — Sauveur. — Euler. — Rameau. — Helmholtz. — Consonance et dissonance expliquées par les battements. — Accords. — Modes majeur et mineur. 285

746. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.

CABOT SCIENCE LIBRARY
CABOT
SEP 03 1998
BOOK DUE
CANCELLED
AUG 3 3 1998

3 2044 019 685 155

3 2044 019 685 155